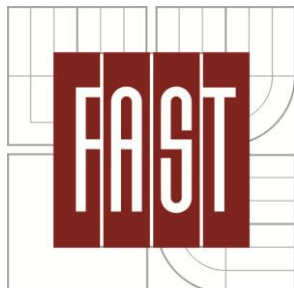


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

## STUDIUM VLASTNOSTÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ S VYUŽITÍM MIKRO A NANO PŘÍMĚSÍ

STUDYING THE PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE USING MICRO AND NANO  
ADMIXTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MIROSLAV GABKO

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Miroslav Gabko
<b>Název</b>	Studium vlastností vysokopevnostních betonů s využitím mikro a nano příměsí
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2014
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2014

## **Zásady pro vypracování**

Současná technologie betonu začíná stále více pro výrobu hlavně speciálních typů betonů (vysokopevnostní, vysokohodnotné, samozhutnitelné atd.) používat stále více různé typy mikro i nano příměsí. Tento trend je pro dosažení vysokých užitných hodnot do budoucna samozřejmostí. Zatím není chování těchto velmi jemných příměsí v cementové matrici stále objasněno. Cílem vaší práce bude sestavit přehled dostupných informací o vlastnostech ultra vysokopevnostních betonů, vlivu různých typů cementů, vodního součinitele, superplastifikačních přísad, typu a tvaru kameniva a zejména mikropříměsí na jejich vlastnosti v zatvrdlém stavu. Klasifikujte všechny používané typy mikro či nano příměsí vhodné pro cementové kompozity a jejich přímé dopady na vlastnosti betonů. U každé příměsí popište původ, výrobu, vlastnosti a jak ovlivňují reologii cementové pasty, tuhnutí, tvrdnutí apod. Ověřte vhodné metody jejich rozmíchávání, zabránění shlukování. V experimentální části ověřte chování vybraných příměsí na reologii cem. kaší metodou rotačního viskozimetru v čase min. 90 minut od zamíchání a poté vyrobte zkušební tělesa o rozměrech 40x40x160 mm pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku ve stáří 7, 28 a 60 dnů. Rozsah : min 40 stran.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá vlastnostmi vysokopevnostních betonů se zaměřením hlavně na využívání mikro či nano přísad. V teoretické části je popsána jejich výroba, vlastnosti a vliv na cementové kompozity jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Také je popsán vliv druhu plastifikační přísady, vybraných vlastností kameniva a druhu cementu. Praktická část je zaměřena na zkoušení cementových malt, do kterých byly přidávány jemně mleté cementy. Sledovaly se pevnosti po 7 a 28 dnech, reologické vlastnosti a vývin hydratačního tepla zkoušených cementů. Dále byl sledován vliv vysokorychlostního míchání cementových malt na jejich vlastnosti.

## **Klíčová slova**

Vysokopevnostní beton, HSC, mikro a nano přísady, popílky, mletá granulovaná vysokopevnostní struska, nanocement, jemně mletý cement, mikromletý vápenec, mikrosilika, nanosilika, metakaolin, uhlíkové nanotrubičky, nano oxid hlinitý, vysokorychlostní míchání

## **Abstract**

The objective of this bachelor thesis is to examine the properties of high strength concretes with the main focus on application of mikro or nano admixtures. In theoretical part their production, the properties and the influence on fresh and hardened properties of cement composites are described. In addition, it explores the influence of plasticizer type, some properties of aggregate and cement types. The practical part focuses on testing cement mortars in which fine cements were added. The compressive and flexural strengths were examined after 7 and 28 days of curing, moreover, rheological properties and heat hydration of cements were also observed. Furthermore, the influence of high speed mixing on cement mortars properties was studied.

## **Key words**

High strength concrete, HSC, micro and nano admixtures, fly ash, slag, nanocement, limestone powder, microsilica fume, nanosilica fume, metakaolin, carbon nanotubes, nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , high speed mixing

### **Bibliografická citace VŠKP**

Miroslav Gabko *Studium vlastností vysokopevnostních betonů s využitím mikro a nano přísad*. Brno, 2015. 91 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc za odborné vedení a pomoc při vypracování této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval všem pracovníkům laboratoří při ústavu THD za ochotnou pomoc při provádění zkoušek a diplomantům Bc. Martinu Labajovi a Bc. Martinu Ťažkému za proškolení s některou laboratorní technikou.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

## Obsah

A	Teoretická část.....	12
1	Úvod.....	12
2	Základní vlastnosti vysokopevnostních betonů.....	13
1.2	Konzistence.....	13
1.3	Pevnost v tlaku.....	13
1.4	Pevnost v tahu za ohybu .....	14
1.5	Modul pružnosti .....	14
2	Složky vysokopevnostních betonů .....	15
2.1	Cement .....	15
2.1.1	Složení portlandského cementu .....	15
2.1.2	Průběh a produkty hydratace cementu.....	17
2.3.2.1.1	C-S-H gel.....	17
2.2	Kamenivo.....	19
2.2.1	Kamenivo hrubé frakce .....	19
2.2.2	Drobné kamenivo .....	22
2.3	Voda – vodní součinitel, superplastifikátory .....	23
2.3.1	Reologie cementového tmele při nízkém vodním součiniteli .....	24
2.3.1	Superplastifikátory .....	24
3	Příměsi.....	28
3.1	Popílký .....	28
3.1.1	Výroba popílků .....	28
3.1.2	Vlastnosti a složení popílků.....	29
3.1.3	Vliv použití popílků na vlastnosti betonu.....	29
3.2	Mletá granulovaná vysokopecní struska .....	32
3.2.1	Výroba strusky.....	32
3.2.2	Vlastnosti a složení granulované strusky .....	32
3.2.3	Vliv použití strusky na vlastnosti vysokopevnostních betonů .....	32



3.3	Mikrosilika – Křemičité úlety .....	34
3.3.1	Výroba křemičitých úletů, mikrosiliky .....	34
3.3.2	Vlastnosti a složení mikrosiliky .....	34
3.3.3	Vliv použití mikrosiliky na vlastnosti vysokopevnostních betonů .....	34
3.4	Metakaolin .....	37
3.4.1	Výroba metakaolinu .....	37
3.4.2	Vlastnosti metakaolinu .....	38
3.5	Mikromletý vápenec .....	41
3.5.1	Výroba jemně mletého vápence .....	41
3.5.2	Vlastnosti jemně mletého vápence .....	41
3.5.3	Vliv použití jemně mletého vápence na vlastnosti vysokopevnostních betonů 41	
3.6	Nanosilika .....	43
3.6.1	Výroba nanosiliky .....	43
3.6.2	Vlastnosti nanosiliky .....	43
3.6.3	Vliv použití nanosiliky na vlastnostech UHSC .....	43
3.7	Nanocement .....	45
3.7.1	Výroba chemicky syntetizovaného nanocementu .....	45
3.7.2	Výroba jemně mletého nanocementu .....	45
3.7.2	Vlastnosti nanocementu .....	46
3.7.3	Vliv použití nanocementu na vlastnosti betonu .....	46
3.8	Uhlíkové nanotrubičky .....	47
3.8.1	Výroba uhlíkových nanotrubiček .....	48
3.8.2	Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček .....	48
3.8.3	Vliv použití uhlíkových nanotrubiček na vlastnostech betonu .....	48
3.9	Nano-oxid hlinitý .....	49
3.9.1	Výroba nano-oxidu hlinitého .....	49
3.9.2	Vlastnosti nano-oxidu hlinitého .....	49
3.9.3	Vliv použití nano-oxidu hlinitého na vlastnostech betonu .....	50

4	Dispergace nejjemnějších příměsí.....	51
B	Experimentální část.....	52
5	Cíl experimentu.....	52
6	Použité materiály.....	52
6.1	Portlandský cement.....	52
6.2	Jemně mletý portlandský cement.....	53
6.3	Plastifikační přísada.....	53
6.4	Kamenivo a voda .....	53
7	Použité zařízení a jejich principy .....	54
7.1	Mastersizer 2000 – Laserová difrakce pro měření velikosti částic.....	54
7.2	Laboratorní míchačka .....	54
7.3	Experimentální míchačka.....	54
7.4	Viscomat NT – Viskozimetr pro měření konzistence pasty .....	55
7.5	Soustava pro měření vývinu hydratačního tepla.....	55
8	Pracovní postupy.....	56
8.1	Laserová difrakce.....	56
8.2	Mletí jemného cementu .....	56
8.3	Způsob návrhu receptur, míchání a příprava vzorků .....	56
8.3.1	Značení vzorků a navržené receptury pro pevnostní zkoušky.....	57
8.3.2	Míchání malty.....	59
8.3.3	Výroba vzorků a způsob ošetřování .....	60
8.4	Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu.....	60
8.5	Měření viskozity .....	61
8.6	Sledování vývinu hydratačního tepla.....	61
9	Výsledky měření .....	63
9.1	Laserová difrakce – měření granulometrie .....	63
9.2	Měření pevností .....	63

9.2.1	Srovnání vlivu přidání jemného/domílaného cementu a vlivu rychlosti otáček	64
9.2.2	Vyhodnocení navržené metody dispergace jemnějších cementů .....	69
9.3	Měření viskozity .....	71
9.4	Měření vývinu hydratačního tepla .....	71
9.5	Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 3 dnech .....	72
10	Diskuze výsledků .....	74
11	Závěr.....	79
12	Seznam použitých zdrojů .....	80
13	Seznam příloh.....	86
13.1	Seznam grafů.....	86
13.2	Seznam obrázků .....	88
13.3	Seznam tabulek .....	88
14	Seznam použitých zkratk.....	90

## **A Teoretická část**

### **1 Úvod**

Vysokohodnotné betony jsou kategorií vyráběných betonů, do které patří i betony vysokopevnostní, jejichž výzkum je důležitou součástí dnešního vývoje stavebních materiálů. Vysokopevnostní betony mají oproti obyčejným betonům několik vylepšených užitných vlastností, hlavně tedy vyšší pevnost a trvanlivost. Jednou z prováděných modifikací tohoto kompozitu je využívání příměsí, tedy práškových složek vstupující do cementové malty, s cílem změnit mikrostrukturu a tím měnit vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. To vede k možnosti efektivního zpracování také druhotných surovin, vznikajících jako odpad při různé průmyslové výrobě. Pokud takové složky vstupují do betonu jako určitá náhrada cementu, dojde hned k dvojímu kladnému dopadu na problematiku zatěžování životního prostředí, které je díky výrobě cementu zatěžováno velkým množstvím oxidu uhličitého. Samotná vysoká pevnost betonu také vede ke snížení potřebného průřezu betonových prvků z hlediska statiky, což může částečně vykompenzovat vyšší finanční náročnost získáním větších rozměrů podlahových ploch vystavěného objektu.

Aplikaci vysokopevnostních (či vysokohodnotných) betonů je v dnešní době možno vidět i na území České republiky, konkrétně například nadezd nad rychlostní komunikací R35 nebo most přes Lochkovské údolí. Stále více se jejich využívání uplatňuje také při výrobě nábytku, hygienických zařízení a jiných designových výrobků.

## **2 Základní vlastnosti vysokopevnostních betonů**

Shrnutí základních vlastností HSC.

### **2.1 Objemová hmotnost**

Vysokopevnostní betony mají většinou vyšší objemovou hmotnost, než běžné betony. Důvodem je hlavně vysoká objemová hmotnost hrubého kameniva vhodného pro HSC (kolem  $3000 \text{ kg/m}^3$ ). Ne tolik podstatný vliv na objemovou hmotnost má fakt, že HSC mají nižší vodní součinitel a větší podíl cementu. Cementový tmel má totiž nižší objemovou hmotnost, než je objemová hmotnost kameniva a jeho zastoupení se zmíněnou redukcí roste.

Norma ČSN EN 206-1 rozděluje zatvrdlý beton (vysušený v sušárně) podle objemové hmotnosti na lehký ( $800 - 2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), obyčejný ( $2000 - 2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a těžký ( $> 2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Pevnostní třídu potom rozdělujeme pouze pro dvě skupiny – obyčejný + těžký beton a lehký beton.<sup>[16][18]</sup>

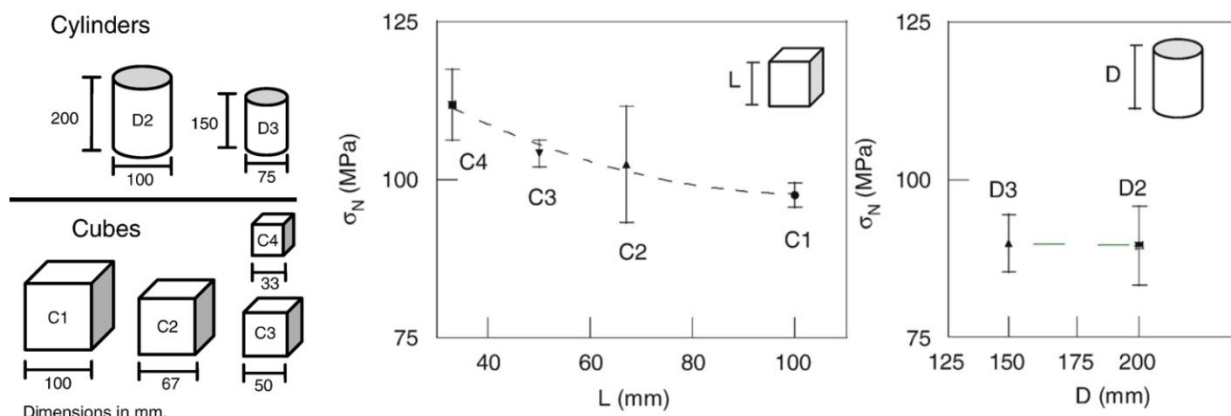
### **1.2 Konzistence**

Konzistence je důležitou vlastností HSC při reálné aplikaci. Pokud má být zajištěna dobrá zpracovatelnost vysokopevnostního betonu, je nutné navrhnout směs se stupněm konzistence S3 až S4 (sednutí kužele 160 – 210 mm) pro transportbeton a pro prefabrikaci F4 – F5 (stupeň rozlití 490 – 620 mm).<sup>[16]</sup>

### **1.3 Pevnost v tlaku**

Pevnost v tlaku je profilující vlastností HSC. Pro normální a těžký beton je pevnostní třída vyšší jak C 60/75 a nižší než C 110/115, pro lehký beton potom třídy LC 50/55 až 80/88. V dnešní době není problém v obecných podmínkách i v ČR dosáhnout takových pevností, ale problém vzniká při jejich reprezentativních měřeních.<sup>[16][18]</sup>

Autor [19] zkoušel pevnost v tlaku na vzorcích tvaru krychle a válce o různých velikostech. Velikost vzorku měla vliv na pevnost hlavně u krychlových vzorků, kdy u menších vzorků byla naměřena vždy vyšší hodnota. U vzorků tvaru válce neměla velikost tak výrazný vliv. Doporučuje se dát pokud možno přednost válcovým vzorkům o průměru 150 mm a výšky 300 mm. Viz graf 1.



**Graf 1: Vliv tvaru a velikosti na zkoušení pevnosti betonu v tlaku**

Dále je nutné používat maximálně přesné formy (dát přednost kovovým), dbát na dobrou pohyblivost kloubu tlačných ploch lisu a zajistit čistotu tlačných ploch od drobných úlomků a prachu, které negativně ovlivňují výsledky zkoušky.<sup>[16]</sup>

## 1.4 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu samozřejmě souvisí s pevností v tlaku. Obvykle se stanovuje zkouškou čtyřbodovým ohybem. U běžných betonů lze očekávat pevnost v tahu zhruba 1/10 tlakové pevnosti, kdežto u HSC s pevností např. 115 MPa může být pevnost v tahu i 1/8 tlakové pevnosti.<sup>[16]</sup>

## 1.5 Modul pružnosti

Modul pružnosti u HSC je vyšší než u běžných betonů a jeho hodnota roste spolu s pevností v tlaku. Teoreticky lze předpokládat, že hodnota modulu pružnosti bude rovna  $E_c = (f_c)^b$ , kdy  $b = 1/3$  (někteří autoři došli k hodnotě  $b = 0,3$  až  $0,4$ ), kdežto u NSC je hodnota  $b$  rovna zhruba  $0,5$ . Obecně lze očekávat hodnoty od 38 do 44 GPa. V případě použití kameniva s vysokým modulem pružnosti dojde k růstu modulu pružnosti betonu.<sup>[16]</sup>

## 2 Složky vysokopevnostních betonů

Všechny jednotlivé vstupní suroviny vysokopevnostních betonů ovlivňují svým druhem, složením a přidaným množstvím konečné vlastnosti kompozitu.

### 2.1 Cement

Abychom mohli pochopit podstatu vysokopevnostních betonů, je třeba znát složení cementu, proces a produkty hydratace cementové malty. To z důvodu, že při makroskopickém pohledu na porušený běžný beton v tlaku, můžeme pozorovat šíření deformace buď maltou, nebo podél rozhraní malty a velkých zrn kameniva, kde se vyskytují hlavně krystaly portlanditu nebo ettringitu.<sup>[1]</sup> Tato vrstva je 10 – 50 μm tenká a je nositelem nižších pevností než kamenivo, nebo samotný zbytek zhydratované cementové pasty.<sup>[2]</sup> Zóna se nazývá tranzitní [1] nebo mezifázová [2]. Dalším důvodem nižších pevností je, že hydráty, tvořící se do prostoru, který byl původně zaplněn vodou, jsou více krystalické a mají tedy nižší pevnost, než produkty hydratace kompaktnějšího tvaru, které vznikají uvnitř původních hranic hydratujících cementových zrn a jsou méně pórovité.<sup>[1]</sup>

#### 2.1.1 Složení portlandského cementu

##### 2.1.1.1 Mineralogické složení

Slínkové minerály jsou výsledkem chemických reakcí mezi oxidy za působení vysokých teplot. Celkem je mineralogických složek více než 20 druhů, ale největší vliv na vlastnosti cementu mají níže popsané 4.

$C_3S$  – Trikalciumpsilikát – Alit –  $3CaO \cdot SiO_2$

Produkty jeho hydratace dodávají cementové pastě počáteční i konečné pevnosti a má velký vývin hydratačního tepla.

$C_2S$  – Dikalciumpsilikát – Belit –  $\beta-Ca_2O \cdot SiO_2$

Vyšší obsah zpomaluje nárůst počátečních pevností, ale na druhou stranu přispívá ke konečným pevnostem. Snížením obsahu redukuje hydratační teplo.

$C_3A$  – Trikalciumaluminát –  $Ca_3Al_2O_6$

Zvýšení jeho obsahu ve slínku vede k vyšším počátečním pevnostem, ale jeho snížení k vyšším konečným pevnostem.

$C_4AF$  – Tetraalkaliumaluminátferit – Celit – Brownmillerit –  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

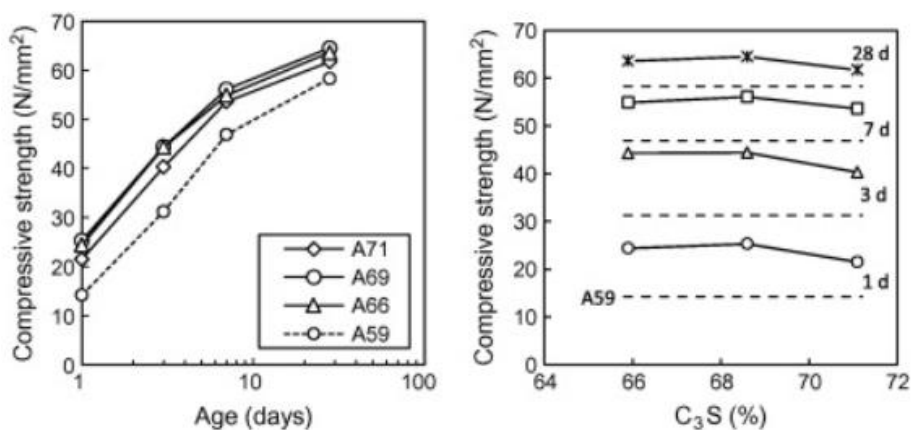
Jeho vliv na pevnost je plynulý a dlouhodobý.<sup>[10][4]</sup>

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Vliv mineralogického složení cementu na pevnosti v tlaku zkoušel autor [40], který reguloval množství  $C_3S$  a  $C_2S$ . Pro dané záměsi použil jako jemné kamenivo říční písek a jako hrubé drcený tvrdý pískovec. Poměry jednotlivých minerálů jsou uvedeny v tabulce 1.

Type of clinker	Mineral composition (%)			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
A71	71.1	1.8	8.6	10.3
A69	68.6	3.4	8.5	10.4
A66	65.9	6.2	8.6	10.3
A59	58.7	14.0	8.5	10.2

**Tabulka 1: Zastoupení minerálů ve zkoušených recepturách**

Nejnižší naměřenou pevnost (počáteční i konečnou) měla receptura s nejnižší dávkou alitu – 59 %, nejvyšší pak s jeho 69% zastoupením. Efektivní zastoupení tohoto minerálu ve slínku je tedy omezené. (Viz graf 2)



**Graf 2: Vliv množství  $C_3S$  ve slínku na pevnosti betonu v tlaku<sup>[40]</sup>**

### 2.1.1.2 Chemické složení

Chemické složení se udává obsahem oxidů. Ve výše popsaném experimentu byl proveden chemický rozbor všech receptur. Receptura s nejlepšími výsledky, resp. s 69 % alitu měla chemické složení:  $CaO$  64,82 %,  $SiO_2$  19,24 %,  $Al_2O_3$  5,37 %,  $Fe_2O_3$  3,42 %,  $MgO$  1,91 % a  $SO_3$  2,80 %.



Možný rozptyl zastoupení jednotlivých oxidů je uvedený v tabulce 2.

Oxid	[%]
CaO	56 – 69
SiO <sub>2</sub>	16 – 26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 – 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 8
MgO	0 – 6
SO <sub>3</sub>	0,5 – 3,5

**Tabulka 2: Chemické složení cementových slínek<sup>[4]</sup>**

### 2.1.2 Průběh a produkty hydratace cementu

Hydratace portlandského cementu probíhá ve třech hlavních etapách - od stavu rozptýlené suspenze cementové pasty až po přeměnu v únosnou soustavu. Počáteční fáze je v prvních 4 hodinách hydratace a je charakterizována zvýšením viskozity cementové pasty. To způsobuje koagulace nově vytvořených částic hydratovaného cementu. Další etapa probíhá do 24 hodin hydratace a důsledkem jsou první mechanické vlastnosti cementové malty. Dochází zde ke kontaktu mezi hydratovanými zrny.<sup>[6]</sup> Časově neomezený je poslední stupeň hydratace, kdy vlivem difuze vody z vnějšího prostředí dochází k hydrataci nezhydratovaných částí cementových zrn.<sup>[7]</sup>

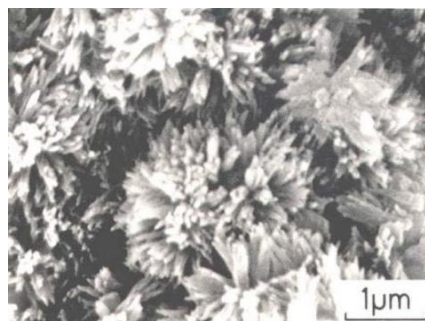
#### 2.3.2.1 Produkty hydratace

Při hydrataci rozlišujeme hlavně tyto produkty:

##### 2.3.2.1.1 C-S-H gel

C-S-H gel je hlavní produkt hydratace a je také hlavním nositelem pevností. Vzniká rozpuštěním kalciumpsilikátů (hlavně C<sub>3</sub>S). Tvoří se na počátku hydratace cementu, kdy začne pokrývat zrna cementu. Jeho obsah je 50-60%.<sup>[6][9]</sup>

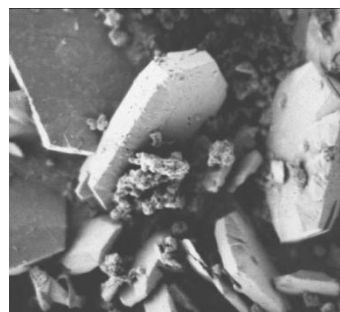
Pro výrobu vysokopevnostních betonů je tento hydrát důležitý, protože jeho kompaktností eliminujeme i tranzitní zónu.



**Obrázek 1: SEM snímek C-S-H<sup>[2]</sup>**

### 2.3.2.1.2 Portlandit – $\text{Ca(OH)}_2$ – CH

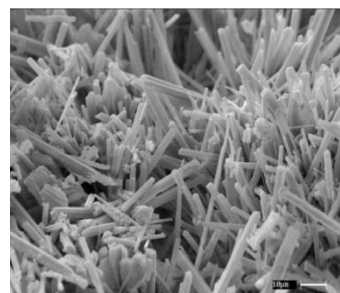
V betonu, díky jeho pH, pasivuje výztuž a tím ji chrání před korozi. Jeho obsah tvoří kolem 15 %. Na pevnost betonu nemá portlandit příliš velký vliv, ale přidavkem příměsí je možná jeho přeměna v únosný C-S-H gel<sup>[3]</sup>.



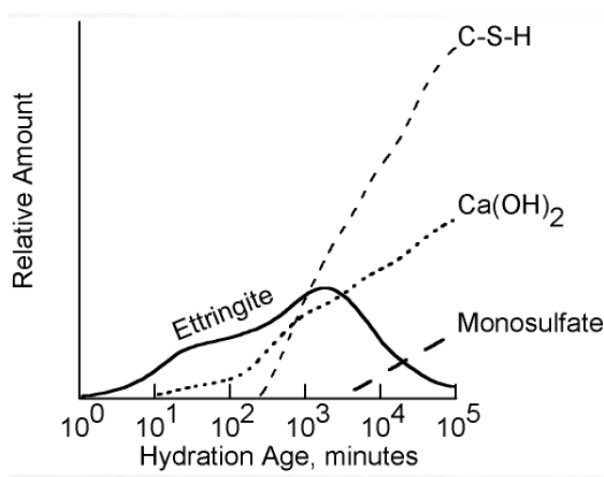
Obrázek 2: SEM snímek CH<sup>[2]</sup>

### 2.3.2.1.3 Etringit – AFt

Vzniká hydratací  $\text{C}_3\text{A}$  a  $\text{C}_4\text{AF}$  hned na počátku smíchání cementu s vodou. Jeho obsah v cementové maltě je 15 – 25 %. Po 9 – 15 hodinách od zamíchání cementu s vodou tvorbou ettringitu dojde k vyčerpání  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů, ettringit se stane nestabilní složkou a přeměňuje se na monosulfát. To má za následek vývin hydratačního tepla a urychlení hydratace dalších fází. Aditiva, ovlivňující rychlost hydratace, souvisí tedy s tvorbou ettringitu<sup>[1]</sup>.



Obrázek 3: SEM snímek AFt<sup>[2]</sup>



Graf 3: Množství jednotlivých hydrátů v závislosti na čase hydratace<sup>[2]</sup>

## 2.2 Kamenivo

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, vysokopevnostní betony mají vlivem přísad a příměsí vyšší pevnost zatvrdlé cementové malty. Tento fakt vede k tomu, že při porušení betonu v tlaku dochází k deformaci přes zrna kameniva. Je proto důležité klást důraz na pevnost, křivku zrnitosti a velikost maximálního zrna, abychom dosáhli požadovaných vlastností.

### 2.2.1 Kamenivo hrubé frakce

Vlastnosti hrubé frakce kameniva jsou rozhodující pro pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti. Je třeba používat kvalitní a hutná kameniva, kdy při navrhování receptury je třeba dbát na celkovou křivku zrnitosti (požadovanou u HSC), tvarový index, mechanické vlastnosti a dobré spolupůsobení s tmelem.<sup>[10]</sup>

#### 2.2.1.1 Druh kameniva

Vhodná jsou kameniva s vysokou pevností v tlaku, jako vápenec a přeměněné horniny plutonického typu – žula, syenit, gabro, diorit, čedič a diabas. Z důvodu dobrého spolupůsobení zrn s maltou je vhodnější používat drcená kameniva z odrazového drtiče, který produkuje zrna požadovaného tvaru. Při drcení vzniká určité množství prachu, který ovlivňuje spolupráci superplastifikátoru s tmelem. Proto je vhodné používat kamenivo prané nebo déle uložené na venkovní skládce.<sup>[1][17]</sup>

Na druhou stranu, výhodou použití těžného kameniva je absence koncentrace napětí na ostrých hranách drceného kameniva.<sup>[13]</sup> Další výhody použití těžného kameniva jsou uvedeny v další kapitole.

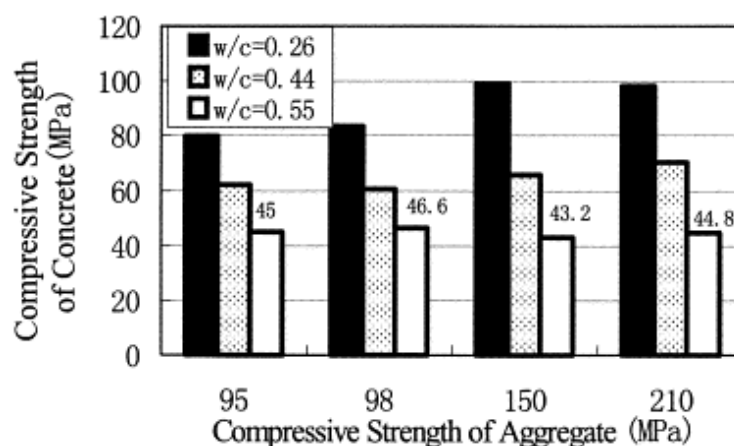
**Vliv na pevnost v tlaku** - Autor [12] testoval různé druhy hrubého kameniva pro různé receptury a dokázal tak, že pro beton s běžnými pevnostmi (v grafu 4 -  $w/c=0,55$ ) nehraje druh nebo pevnost kameniva na pevnosti betonu v tlaku roli a zároveň prokázal, že pro vysokopevnostní betony (v grafu 4 –  $w/c=0,26$ ) jsou tyto faktory podstatné. Bylo použito drcené kamenivo s maximálním zrnem 20 mm. Jako hrubé kamenivo o pevnosti 210 MPa byl použit křemenec, 150 MPa žula, 98 MPa vápenec a 95 MPa mramor. Vysokopecní struska byla přidána u všech receptur, stejně jako plastifikátor na bázi sulfonovaného naftalen-formaldehydového kondenzátu. Zástupce drobného kameniva byl říční písek s modulem jemnosti 2,85. Jednotlivé receptury jsou uvedeny v tabulce 3. Pevnosti v tlaku byly změřeny po 28 dnech.

Relative proportions of concrete mix

Water	Binder <sup>a</sup>		Coarse aggregate	Sand	Superplasticizer <sup>b</sup> (%)
	Cement	Slag			
0.26	0.7	0.3	1.41	0.94	1.25
0.44	0.7	0.3	2.91	1.94	1.25
0.55	0.7	0.3	3.0	2.0	0.5

<sup>a</sup> For  $W/C=0.26$ , total binder = 674 kg/m<sup>3</sup>; for  $W/C=0.44$ , total binder = 382 kg/m<sup>3</sup>; for  $W/C=0.55$ , total binder = 340 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>b</sup> Percentage by mass of binder.

Tabulka 3: Zastoupení složek jednotlivých receptur<sup>[12]</sup>Graf 4: Závislost pevnosti betonu na pevnosti kameniva při různém dávkování vody<sup>[12]</sup>

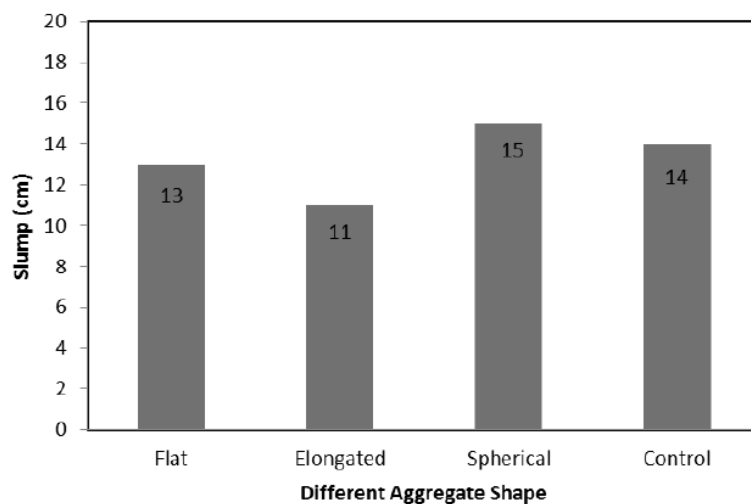
Na pevnost v tahu betonu neměla pevnost v tahu kameniva příliš velký vliv ani u receptury navržené na vyšší pevnosti.

### 2.2.1.2 Tvarový index

Nejvhodnější jsou zrna kubického tvaru, a proto se tvarový index musí blížit k 1. Drcené kamenivo podlouhlého destičkovitého tvaru má nižší pevnost a je nevýhodné z hlediska reologie. Směs z nich je špatně zpracovatelná a pro dosažení požadované konzistence je třeba zvýšit vodní součinitel.<sup>[1]</sup>

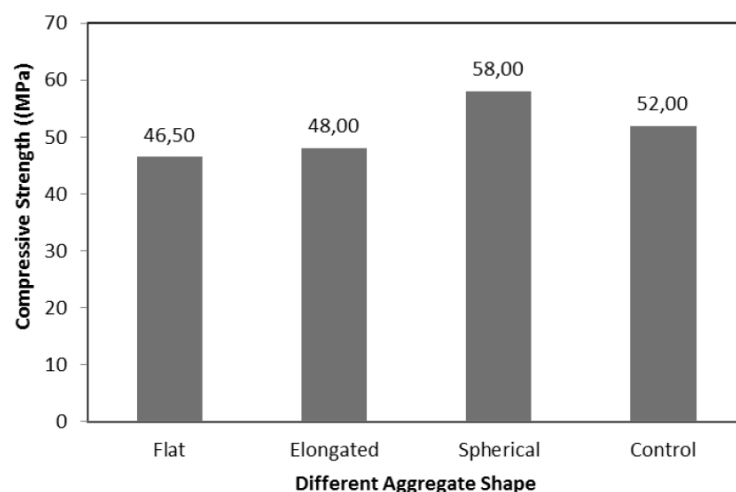
Autor [21] zkoušel vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu s aplikací kameniva různého tvaru – ploché, prodloužené, sférické a pro referenční mix zrna všech tvarů. Třídění zrn podle tvaru prováděl ručně. Maximální zrno hrubého kameniva bylo 16 mm s relativně plynulou křivkou zrnitosti. Jako pojivo byl použit cement CEM I 42,5 R a vodní součinitel  $w/c = 0,30$ . Vzorky válcového tvaru o průměru 100 mm a výšky 200 mm byly po jednom dni uloženy do vápnem nasycené vody po dobu zrání 28 dní. Autor zjistil, že tvar zrn má vliv na beton jak v čerstvém tak v zatvrdlém stavu.

**Vliv na konzistenci** – Nejlepší účinek mělo kamenivo kubického tvaru, u jehož záměsi byly naměřeny nejvyšší hodnoty sednutí kužele (to dokazuje negativní vliv zrn s tvarovým indexem vzdálených od 1 na zpracovatelnost) při stejném vodním součiniteli. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 5.



**Graf 5: Vliv tvaru zrn hrubého kameniva na sednutí kužele ČB<sup>[21]</sup>**

**Vliv na objemovou hmotnost a pevnost v tlaku** - Nejvyšší hodnota objemové hmotnosti byla naměřena u sférických zrn, stejně jako v případě pevnosti v tlaku. Ačkoliv se vytřížené sférické kamenivo projevilo dobrými vlastnostmi, příliš se hodnoty nelišily od referenční záměsi, která obsahovala všechny tvary zrn. Rozdíl mezi plochým a podlouhlým kamenivem byl však výrazný. Výsledné hodnoty viz graf 6.



**Graf 6: Vliv tvaru zrn hrubého kameniva na pevnost betonu v tlaku<sup>[21]</sup>**

**Vliv na kompaktnost betonu** - Metodou měření ultrazvukové pulzní rychlosti byla také zjištěna větší kompaktnost kompozitu se sférickým kamenivem, kdy s rostoucí hodnotou tvarového indexu rostla rychlost ultrazvukových impulzů.

#### **2.2.1.3 Velikost maximálního zrna**

Používají se zrna do 16 mm a za nejbezpečnější se považují zrna o maximální velikosti 10 – 12 mm. U použití kameniva s  $D_{\max} > 25$  mm může dojít k tvorbě mikrotrhlin na hranici zrn kameniva z důvodu smršťování tvrdnoucí cementové pasty.<sup>[1]</sup>

#### **2.2.2 Drobné kamenivo**

Písek, používaný u vysokopevnostních betonů, má obvykle zrnitost doporučenou pro běžné betony. Avšak použitím drobného kameniva s modulem jemnosti 2,5 – 3,0 (tj. poměrně hrubé, s minimálním obsahem jemných částic) docílíme lepší zpracovatelnosti a nižší segregace. Aplikací písku s vyšším modulem jemnosti také redukuje potřebné množství vody pro požadovanou konzistenci.<sup>[1][10]</sup>

## 2.3 Voda – vodní součinitel, superplastifikátory

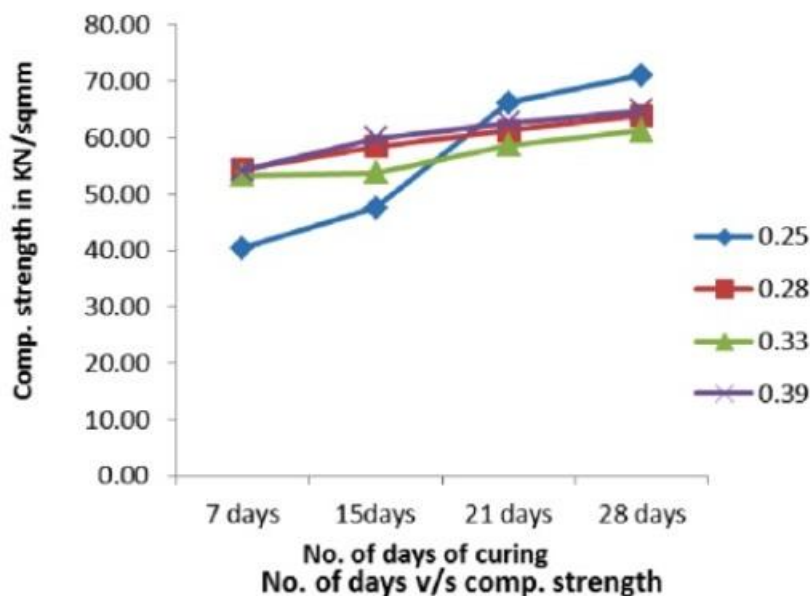
Množství vody má na vlastnosti vysokopevnostních betonů vliv hlavně z důvodu procesů hydratace cementové pasty. Vodní součinitel, redukovaný superplastifikátory na hodnoty v rozmezí 0,20 – 0,40 způsobuje, že cementová zrna zcela nezhydratují a v cementovém kameni mají charakter plniva (pevnost zrn slínku je 200 – 400 MPa).

Menší množství vody také způsobí, že zrna cementu, po smíchání s vodou, mají mezi sebou menší vzdálenosti a tedy méně prostoru k tvorbě vnějších hydrátů. Vzhledem ke struktuře vnějších produktů hydratace dochází ke snížení pórovitosti a zvýšením pevnosti.

[1][11]

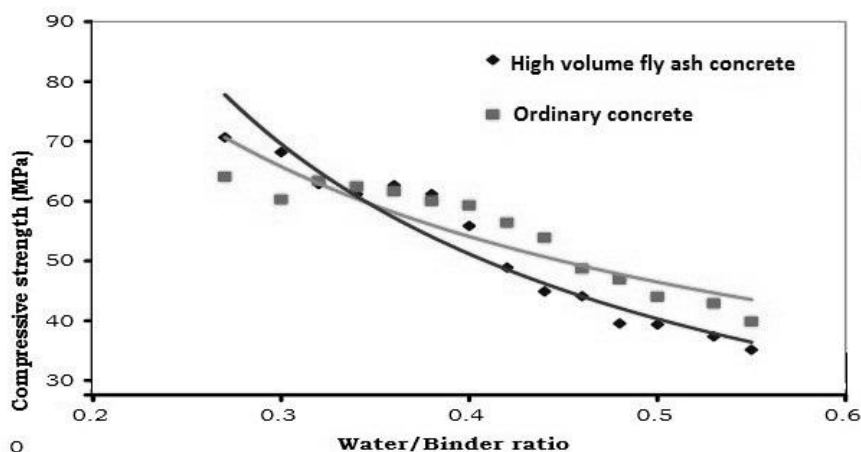
Vodní součinitel se udává jako poměr voda/pojivo, kde za pojivo považujeme cement + příměsi, které se násobí „k“ hodnotou, která je pro každou příměs individuální.

**Vliv na pevnosti v tlaku** - Autor [14] měřil pevnost v tlaku pro beton s vodními součiniteli  $w = 0,25; 0,28; 0,33$  a  $0,39$ . U každé receptury bylo upraveno množství superplastifikátoru pro požadované sednutí kužele ~ 270 mm. Receptura s nejnižším vodním součinitelem vykazovala nejvyšší konečné pevnosti, ale nejnižší počáteční pevnosti. V tomto experimentu autor uvádí jako nejvhodnější  $w = 0,33$  z důvodu dobrého nárůstu pevností a malým rozdílem mezi počáteční a konečnou pevností v tlaku.



Graf 7: Vliv poměru voda/pojivo na pevnost betonu v tlaku<sup>[14]</sup>

Autor [15] porovnával vliv vodního součinitele na pevnost v tlaku betonu s vysokým obsahem popílku a běžného betonu. Beton s cementem z části nahrazeným popílkem vykazoval nižší pevnosti v tlaku při  $w > 0,40$  než běžný beton, ale vyšší pevnosti u nižšího  $w$ . Superplastifikátor použil u obyčejného betonu při  $w/c < 0,48$  a u betonu s popílkem při  $w/c < 0,48$  resp.  $w/b < 0,32$ .



**Graf 8: Vliv poměru voda/pojivo na pevnost betonu s vysokým obsahem popílku a běžného betonu<sup>[15]</sup>**

### 2.3.1 Reologie cementového tmele při nízkém vodním součiniteli

Při použití vodního součinitele  $w = 0,2 - 0,4$  ztrácí čerstvý beton požadované reologické vlastnosti, které jsou potřebné pro dostatečné ztuhnutí. Může za to také velké množství nenasyčených povrchových nábojů zrn cementu, které při kontaktu s polarizovanou vodou flokulují. V těchto flokulích se zachycuje voda, která již nepřispívá k dobrému zpracování betonu. Pro požadovanou konzistenci by bylo potřeba použít více vody, což by mělo negativní účinky.

Vzhledem k tomu, že není možné vyrobit portlandský cement, jehož zrna by neflokulovala, je třeba použít chemických přísad – superplastifikátorů. Ty tento jev eliminují, a umožní nám vyrobit beton požadované konzistence s nízkým vodním součinitelem.<sup>[1]</sup>

### 2.3.1 Superplastifikátory

Podle chemického složení můžeme superplastifikátory rozdělit:

- Polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a melaminů (SMF)
- Polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a naftalenů (SNF)
- Polykarboxyláty (PC)



V dnešní době jsou nejpoužívanější superplastifikátory na bázi polykarboxylátů. Jsou tvořené organickými makromolekulami s dlouhými postranními řetězcemi, které se adsorbují na povrch zrn cementu a v důsledku sterického odpuzování výrazně ovlivňují konzistenci čerstvého betonu i při nízkém vodním součiniteli. Superplastifikátory SMF a SNF se dávkuje nad 1,5 % z hmotnostního podílu cementu v receptuře. Polykarboxyláty výrazně ovlivní konzistenci i při dávce několik desetin procent hmotnosti cementu.<sup>[1][11][20]</sup>

Autor [20] zkoušel vliv druhu superplastifikátoru na vlastnosti čerstvé a zatvrdlé cementové malty s příměsí popílku – CEM II-A/V 42,5 R. Srovnával působení SMF, SNF, PC a PCE (polykarboxylát ether). Pro každou zkoušku vytvořil 4 směsi s různými superplastifikátory a jednu s jeho absencí jako referenční.

**Vliv na hydratační proces** – pro tuto zkoušku míchal vodu s cementem a plastifikátorem několik minut. Vodní součinitel byl konstantní  $w = 0,5$  a dávkování superplastifikátorů bylo podle jejich účinnosti - SMF – 0,57 %, SNF – 0,33 %, PC – 0,22 % a PCE – 0,22 %. Hydratující cementové pasty byly umístěny do diferenčního kalorimetru s teplotou prostředí 25°C po dobu 72 hodin. Zjistilo se, že ani jeden z použitých superplastifikátorů neměl výrazný vliv na průběh hydratace. Zkoumané hydratační teplo u referenční malty bylo po 24h 136 J/g, 41h 195 J/g a 72h 215 J/g. Skupina PC a PCE dosahovala tepla po 24h 127-131 J/g, 41h 185-193 J/g a 72h 202-215 J/g. U SMF a SNF bylo naměřeno nižší teplo, resp. větší vliv na hydrataci cementu – po 24h 116-120 J/g, 41h 167-173 J/g a 72h 182-190 J/g.

**Vliv na počátek doby tuhnutí** – Byly vytvořeny stejné záměsi jako u malt pro zkoušení kalorimetrem. Každá z nich se zkoušela ve Vicatově přístroji tak dlouho, než jehla penetrovala tuhnoucí maltu 5 mm nad podložku. Referenční malta měla počátek tuhnutí v 252 min, malta s PC 275 min, PCE 266 min, SMF 292 min a SNF 286 min. Dalo by se tedy předpokládat, že kompozity s využitím SP na bázi SMF a SNF si tedy déle udrží svoji zpracovatelnost.

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Malta obsahovala 450 g cementu, 1350 g normového písku a vodní součinitel byl  $w = 0,5$ . Dávkování superplastifikátorů bylo stejné jako v předchozích zkouškách. Autor zjistil, že pevnosti jednotlivých receptur s různými SP se liší. Nejpozitivnější vliv měli SP na bázi polykarboxylátů. Autor také uvádí, že naměřené výsledky neprokázaly příliš velké rozdíly pevností jednotlivých receptur ve srovnání s referenční maltou. Jako důvod udává dávkování superplastifikátorů, které by optimálně mělo přesahovat 1 % z hmotnosti cementu, kdežto v tomto experimentu byly použity mnohem nižší dávky. Výsledné pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.

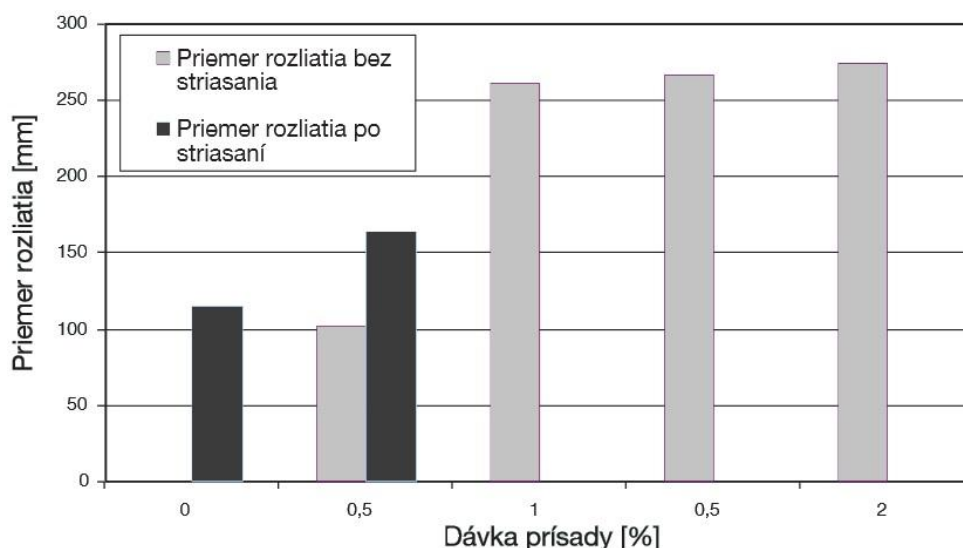
Cement sample	Water reducer content (wt%)	Compressive strength value (MPa)				
		2 d	7 d	28 d	90 d	180 d
CEM II	–	22.2	31.9	42.9	58.1	63.8
CEM II-SMF	0.57	23.1	34.0	46.0	61.1	65.8
CEM II-SNF	0.33	23.6	34.3	46.3	61.6	66.8
CEM II-PC	0.22	24.2	36.5	49.8	63.1	68.7
CEM II-PCE	0.22	25.1	38.4	52.4	65.7	72.2

**Tabulka 4: Vliv druhu superplastifikátoru na pevnosti v tlaku<sup>[20]</sup>**

### 2.3.1.2 Dávkování superplastifikátoru

Autorka [22] zkoušela vlastnosti cementových malt s různými dávkami superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů, konkrétně Beramet HT5221. Zkušební vzorky byly vyrobeny ze 450 g cementu CEM I 42,5 R, 1 350 g normového písku a 225 g vody. Malty s dávkou superplastifikátoru měly proměnlivé množství vody v závislosti na množství SP, které bylo aplikováno z 0,5 %, 1 %, 1,5 % a 2 % hmotnosti cementu.

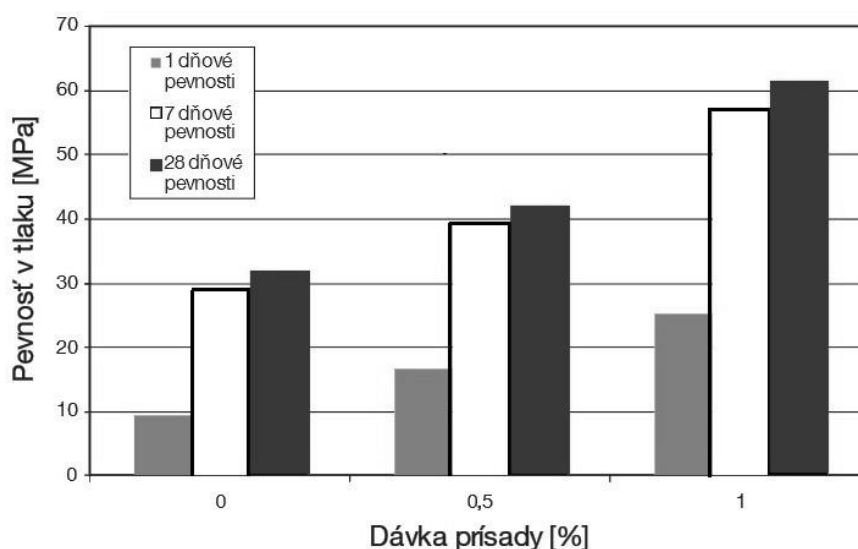
**Vliv na konzistenci (optimální dávka)** – Konzistence byla měřena rozlitím. Spolu s větší dávkou rostla i konzistence, ale hraniční hodnota, kdy průměr rozlití narůstal nepatrně, byla dávka 1 % hmotnosti cementu. Vyšší dávka vedla k segregaci a odlučování záměsové vody. Referenční malta bez SP měla průměr rozlití 110 mm a malta s optimální dávkou SP 1 % měla rozlití průměr 262 mm. Autorka prokázala také velkou účinnost zkoušené přísady, kdy otestovala potřebný vodní součinitel k dosažení průměru rozlití 260 mm, který byl  $w = 0,84$ .



**Graf 9: Vliv dávky superplastifikátoru na rozlití kužele<sup>[22]</sup>**

**Vliv na počátek doby tuhnutí** – Ztrátu zpracovatelnosti měli všechny receptury přibližně za stejný čas jako referenční malta. Autorka uvádí, že použitá přísada ovlivňuje počátek doby tuhnutí jen nepatrně.

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Pevnost v tlaku byla měřena po 1, 7 a 28 dnech a porovnáována na vzorcích, které měli recepturu s konstantním  $w = 0,5$  a zvlášť vzorcích s upraveným vodním součinitelem podle požadovaného rozlité 260 mm. V prvním případě přítomnost SP vedla k nepatrnému snížení počátečních pevností (z důvodu mírného zpomalovacího účinku SP), ale výsledné pevnosti byly výrazně vyšší. U malt s různým vodním součinitelem a stejnou hodnotou rozlité kužele byly zjištěné podstatné rozdíly v pevnostech v tlaku. Malty obsahující účinný SP měli nízký vodní součinitel, což vedlo k růstu pevností v tlaku.



**Graf 10: Vliv dávky superplastifikátoru na pevnosti v tlaku (rozdílné  $w$ )<sup>[22]</sup>**

Zvýšenou pevnost malt s konstantním vodním součinitelem, při použití SP, autorka přisuzuje lepší dispergaci cementových zrn, což vytváří lepší podmínky pro hydrataci a také zvyšuje kompaktnost C-S-H gelu.

**Vliv na smrštění cementového kamene** – V recepturách, s konstantním vodním součinitelem, rostoucí dávka SP zvětšovala smrštění cementového kamene. Tento rozdíl však nepřesáhl hodnotu jedné desetiny promile. V případě různého  $w$  a stejné konzistence došlo u referenční směsi k většímu smrštění oproti směsi s optimální dávkou SP 1 % hmotnosti cementu. Hodnota se blížila k 0,3 ‰. Tento fakt zapříčinil velký obsah vody v maltě bez SP.

### 3 Příměsi

Dle ČSN EN 206 – 1 je příměs definována jako práškovitý materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení vlastností nebo k docílení speciálních vlastností betonu. Příměsi lze rozdělit na dva druhy: téměř inertní příměsi (druh I) a latentní hydraulické příměsi (druh II). Převážná část látek, označených jako příměsi, se používají také při výrobě cementu a v závislosti na podílu se nazývají hlavní nebo vedlejší složka cementu.

V době, kdy nebyly vyvinuty dostatečně účinné plastifikátory, resp. superplastifikátory, se příměsi používali pouze k náhradě části cementového podílu v receptuře. Vlastnosti příměsí, které zvyšují pevnost a trvanlivost betonu byly znehodnoceny zvýšenou dávkou vody, potřebnou pro požadovanou konzistenci.<sup>[22][23]</sup>

Dnes již používáme příměsi k úpravě mikrostruktury cementového tmele efektivně, stejně jako směsné cementy, které byly dříve také podceňovány. Podle funkce, tedy podle nahrazované složky betonu, rozdělujeme příměsi na nahrazující či doplňující drobné kamenivo, nebo příměsi nahrazující podíl cementu.

#### 3.1 Popílký

Křemičité popílký jsou nejčastěji používanou pucolánovou příměsí do betonu v ČR. Vznikají spalováním tuhých paliv a podle ČSN EN 450-1 je možno používat popílký z různých kotlů a různých druhů spalovaných materiálů. Rozlišujeme dva druhy popílků a to buď klasický, nebo fluidní. Použitelnost fluidních popílků je omezená z důvodu vyššího obsahu CaO, který může způsobovat vznik etringitu<sup>[20][25]</sup>

##### 3.1.1 Výroba popílků

Klasické popílký vznikají při spalování uhlí v tepelných elektrárnách na běžném roštu, kdežto při produkci fluidních popílků je uhlí nejprve jemně namleto a spalováno v rozvířeném stavu. Získávají se v usazovacích komorách nebo cyklonech. Jelikož popílký nejsou vyráběny cíleně, ale jedná se o druhotnou surovinu, jejich vlastnosti jak chemické, mineralogické tak i granulometrické se liší vlivem vlastností spalovaného materiálu, technologií dané elektrárny a odlučování z exhalátů. Menší diferenci těchto vlastností prokazují černouhelné popílký, ale v ČR je větší produkce hnědouhelných popílků (80 %).<sup>[25][11]</sup>

### 3.1.2 Vlastnosti a složení popílků

Popílký mají kulovitý tvar (hnědouhelné více nepravidelný) a sklovitou strukturu. Velikost kuliček je o průměru 0,001 – 0,1 mm. Krystalickou složku klasických popílků tvoří křemen, mullit, cristobalit, tridymit a amorfni oxid křemičitý. Fluidní popílký obsahují amorfni hlinitokřemičitou fázi, křemen, anhydrit, volné vápno a působením vlhkosti také hydroxid a karbonát vápenatý. Chemické složení klasických popílků: SiO<sub>2</sub> (40 – 57 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (19 – 30 %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5 – 16 %), CaO (3 – 15 %), MgO (0,9 – 3 %), SO<sub>3</sub> (0,1 – 1,9 %), K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (hodnoty z některých našich a slovenských elektráren). Popílek také obsahuje zbytky původního nebo různě přeměněného paliva. Objemová hmotnost volně sypaného popílku je 550 – 900 kg·m<sup>-3</sup> [26][29].

### 3.1.3 Vliv použití popílků na vlastnosti betonu

Popílek ovlivňuje vlastnosti betonu již od počátku hydratace, kdy snižuje hydratační teplo, celý proces zpomaluje a tím snižuje počáteční pevnosti. Konečné pevnosti, které se projevují až dlouhodobě, jsou však vyšší. Propustnost snižuje zvýšenou hutností mikrostruktury, zabraňuje bleedingu, zlepšuje čerpatelnost a jeho aplikaci lze docílit hladšího povrchu betonu. [13]

**Vliv na konzistenci, hydrataci a počáteční dobu tuhnutí** – Autor [27] měřil vliv použití popílku a jeho množství na sednutí kužele v průběhu času. Portlandský cement nahradil z 10, 20 a 30 % popílkem. Referenční směs byla bez popílku. Vodní součinitel byl konstantní w = 0,63 a nebyl použit žádný plastifikátor.

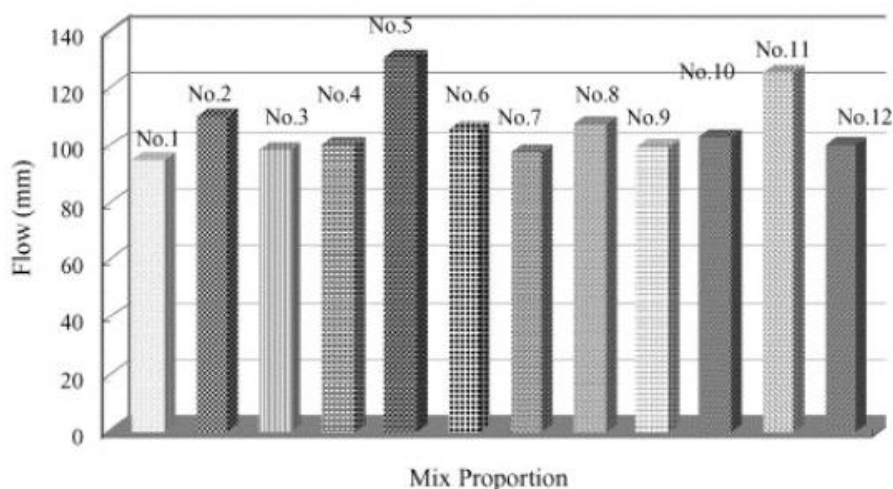
Concrete mix	Slump (mm)			
	0 min	30 min	60 min	90 min
Control Mc	10	0		
Fly ash M 10%	20	5	0	
Fly ash M 20%	50	15	8	0
Fly ash M 30%	60	13	12	0

Tabulka 5: Vliv množství popílku na sednutí kužele v čase [27]

Receptura, která obsahovala největší množství popílku, měla také nejměkčí konzistenci a svoji zpracovatelnost si zachovala nejdéle. S nižší dávkou popílku klesala i hodnota sednutí a doba zpracovatelnosti. Díky popílkům můžeme tedy snížit vodonáročnost s dosažením potřebné konzistence, s čímž je spojeno získání dalších vhodných vlastností, jako např. pevnosti v tlaku apod. Rozdíl časů ztráty tekutosti betonu s 30% podílem popílku a betonu referenčního byl přibližně 60 minut, což dokazuje zpomalení hydratace a oddálení tuhnutí.

Tento fakt dokázal i autor [28], kdy po nahrazení 25 % a 45 % cementu popílkem, s nízkým obsahem CaO, změřil kalorimetrem teplotu hydratace betonu. Referenční beton bez popílku měl po 10,9 h maximální vývin tepla 2,40 W/kg, s 25% nahrazením cementu popílkem po 11,5 h vývin 1,84 W/kg a s 45% nahrazením cementu popílkem po 12,5 h vývin tepla 1,27 W/kg. Vyšší obsah popílku tedy snížil maximální vývin tepla a také oddálil dobu jeho dosažení.

Vliv velikosti částic na reologii cementové malty zjišťoval autor [34], který prováděl zkoušku rozlitím na maltách o složení cement-vápno-písek-popílek v poměru 0,7-0,5-6-0,8 a 1-1-6-0 pro referenční směs bez popílku. Vodní součinitel voda/pojivo = 0,61. Základní velikosti částic byly 18,8  $\mu\text{m}$ , 9,1  $\mu\text{m}$ , 5,4  $\mu\text{m}$  a 2,8  $\mu\text{m}$ . Ty autor použil buď samostatně, nebo smícháním dvou frakcí v poměru 1:1. Z grafu 11 je zřejmé, že největší (seřazení sestupně) vliv na konzistenci měl popílek frakce 2,8  $\mu\text{m}$  (No. 5), 2,8  $\mu\text{m}$  + 5,4  $\mu\text{m}$  (No. 11), 18,8  $\mu\text{m}$  (No. 2), 18,8  $\mu\text{m}$  + 9,1  $\mu\text{m}$  (No. 8) a 18,8  $\mu\text{m}$  + 2,8  $\mu\text{m}$  (No. 6). Ostatní kombinace měly v porovnání se zmíněnými menší vliv na konzistenci. V závěru lze však říci, že jakákoliv frakce popílku ovlivňuje zpracovatelnost tmele, jemnější částice pak více.



**Graf 11: Vliv velikosti částic popílku na výsledky zkoušky rozlitím**

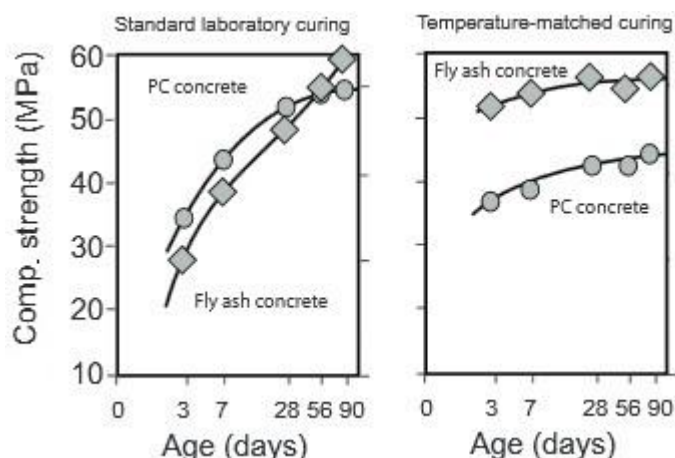
**Vliv na pevnosti v tlaku** – Autor [28] také měřil pevnosti v tlaku, výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

w/b Ratio	% Fly ash	Constitution (kg/m <sup>3</sup> )					Superplas- ticizer (l/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)			
		Water <sup>a</sup>	Cement	Fly ash	Sand	Granite		3 Days	7 Days	28 Days	90 Days
0.24	0	150	637	0	711	936	18.4	70.0	79.5	97.4	110.2
0.24	25	150	475	158	681	924	18.3	62.3	74.6	105.9	124.5
0.24	45	148	347	283	639	920	23.7	42.5	56.3	89.4	107.2
0.19	0	135	702	0	641	949	35.1	78.0	83.5	96.8	114.5
0.19	25	133	512	173	620	932	34.7	66.8	74.2	102.3	123.6
0.19	45	130	372	305	608	927	33.8	41.7	56.4	88.5	109.2

**Tabulka 6: Receptury a vliv použití a množství popílku na pevnosti betonu v tlaku<sup>[28]</sup>**

Počáteční pevnosti po 3 dnech klesaly s rostoucí dávkou popílku. Tento rozdíl se zmenšoval s nárůstem doby ošetřování betonu, až byly po 28 dnech naměřeny hodnoty vyšší, než u referenčních záměsí. Optimální množství nahrazeného cementu popílkem se v této zkoušce projevilo 25 %, protože 45% nahrazení vykazovalo nižší pevnosti.

Bamborth [uvádí autor 30] testoval pevnosti v tlaku betonu dvou stejných dvojic receptur. Jednu referenční záměs bez popílku a jednu s popílkem ošetřoval při laboratorních teplotách, kdežto druhou dvojici referenčního a popílkového betonu při zvýšené teplotě. Zjistil, že při druhém způsobu ošetřování je nárůst počátečních pevností popílkového betonu dvojnásobně vyšší, než u ošetřování při laboratorní teplotě. Výrazně se zvýšil i nárůst pevností oproti referenčnímu betonu ošetřovaného při vyšší teplotě. Konečné pevnosti byly nižší, než za běžného ošetřování, ale rozdíl popílkového betonu při ošetřování za laboratorní teploty a zvýšené teploty nebyl tak velký, jako v případě referenčního betonu. Použití popílku u protetpovaných betonů s vysokým náběhem pevností se jeví jako velmi efektivní.



**Graf 12: Vliv působení vyšší teploty při ošetřování betonu na pevnosti v tlaku<sup>[30]</sup>**

## 3.2 Mletá granulovaná vysokopecní struska

Granulovaná vysokopecní struska se používá především do směsných cementů, ale lze ji efektivně uplatnit, ať už z technického nebo ekonomického hlediska, jako příměs do betonu. Použití strusky se řídí normou ČSN EN 15167-1. Vyznačuje se latentní hydraulicitou.<sup>[24]</sup>

Stejně jako v případě popílku se jedná o druhotnou surovinu, tentokrát získanou při hutní výrobě.

### 3.2.1 Výroba strusky

Strusky vznikají roztavením hlušiny rudy, přísadků struskotvorných látek a minerálních podílů z pevných paliv. Do betonu se používají nejčastěji strusky vysokopecní, které lze získat při redukci železa ve vysokých pecích. Struska vytéká v průběhu tzv. struskovém odpichu při teplotě 1400 – 1500 °C.<sup>[26]</sup> Při rychlém ochlazení strusky pomocí tlakové vody vzniká skelná fáze strusky, která má latentně hydraulické vlastnosti, oproti pomalu chlazené (krystalické strusce), která ani po mletí hydraulicitu nevykazuje a používá se jako kamenivo.

### 3.2.2 Vlastnosti a složení granulované strusky

V ČR se dodává struska s měrným povrchem zhruba 350 – 420 m<sup>2</sup>/kg, velikost zrn je tedy podobná jako u cementu. Běžné chemické složení, vyjádřené obsahem oxidů: SiO<sub>2</sub> (25 – 45 %), CaO (26 – 45 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4 – 15 %), FeO (0,2 – 2,8 %), MnO (0,2 – 10,5 %), MgO (4 – 15 %), F<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (< 2 %) a S<sup>2-</sup> (0,5 – 3 %).

### 3.2.3 Vliv použití strusky na vlastnosti vysokopevnostních betonů

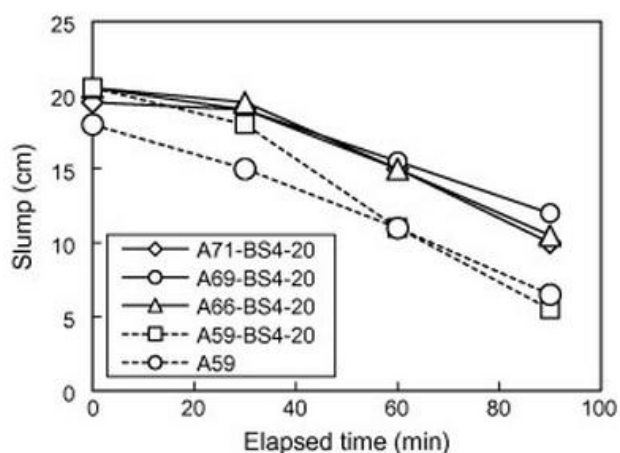
Použití strusky přináší jako většina příměsí ekonomické, technologické a environmentální výhody. Aplikace strusky má obvykle za následek nižší počáteční pevnosti a prodlouženou dobu počátku doby tuhnutí. Nejdůležitější vlastností je, že při její aplikaci dosahujeme vyšší odolnosti proti agresivnímu prostředí. Při zvolení vhodného typu cementu lze dosáhnout i výrazně vyšších pevností betonu v tlaku.<sup>[40][41]</sup>

**Vliv na hydrataci cementu** – Autor [41] měřil vliv množství strusky v cementové pastě (o složení: pojivo 350 g, normový písek 1050 g, voda 175 g) na hydrataci. Nahradil cement z 30, 50 a 70 % struskou. Pomocí kalorimetrie bylo zjištěno, že se vrůstajícím množstvím



strusky hydratační teplo klesalo. Použití strusky má tedy za následek zpomalení hydratace, což dokazuje i množství vázané vody, které bylo měřeno termogravimetrií. S časem množství této vody rostlo, ovšem s rostoucím zastoupením strusky dosahovalo nižších hodnot. Termogravimetrií bylo měřeno množství portlanditu, které rovněž s rostoucím množstvím strusky klesalo a to již po 48 h hydratace. Lze tedy předpokládat, že počáteční pevnosti betonu s přidáním strusky budou nižší, ale konečné, díky pucolánové reakci, vyšší.

**Vliv na konzistenci a počátek doby tuhnutí** – Autor [40] měřil konzistenci pomocí sednutí kužele. Jeho zkoušky byly zaměřeny na závislosti mezi složením cementu a množství jeho nahrazení struskou. V grafu 13 je zobrazeno sednutí kužele v čase pro beton s cementem s různým obsahem  $C_3S$  (59 – 71 %) ve slínku a s 20% obsahem strusky. Obecně lze konstatovat, že použitím strusky dosáhneme lepší konzistence při konstantním vodním součiniteli. Nejvyšší hodnotu sednutí i po 90 min hydratace měla malta s cementem s obsahem 69 %  $C_3S$ .



**Graf 13: Vliv použití strusky na sednutí malty s různým druhem cementu<sup>[40]</sup>**

**Vliv na pevnosti betonu v tlaku** – Stejný autor zkoušel receptury s různými druhy cementů (obsah  $C_3S$  59 a 69 %) a obsahem strusky 20 % na pevnosti v tlaku. V obou případech různých obsahů alitu byly počáteční pevnosti v tlaku s použitím strusky nižší, než u receptury bez náhrady cementu struskou. Pevnosti po 28 dnech byly srovnatelné a po 90 dnech byly pevnosti vyšší u receptur s použitím strusky.

### 3.3 Mikrosilika – Křemičité úlety

Jedná se o jeden z nejúčinnějších pucolánů. Jejich použití se řídí normou ČSN EN 13263-1.<sup>[24]</sup>

#### 3.3.1 Výroba křemičitých úletů, mikrosiliky

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku v obloukové peci, kde je křemen redukován v přítomnosti paliva (a železa v případě ferrosilicia). Během redukce vzniká plynný SiO (teplota > 2000°C), ten uniká horní části pece, kde se ochlazuje, kondenzuje a hlavně oxiduje ve formě jemných částic SiO<sub>2</sub>. Částice se shromažďují v odlučovacím systému. Uměle vyráběné se nazývají mikrosilika.<sup>[1]</sup>

#### 3.3.2 Vlastnosti a složení mikrosiliky

Velikost zrn křemičitých úletů je 0,1 – 0,3 μm při měrném povrchu 1500 – 2500 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup> a měrné hmotnosti 2120 kg·m<sup>-3</sup>. Obsahují velké množství amorfního SiO<sub>2</sub> (80 – 99 %), dále Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,5 – 3 %) a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,7 – 2,5 %).

#### 3.3.3 Vliv použití mikrosiliky na vlastnosti vysokopevnostních betonů

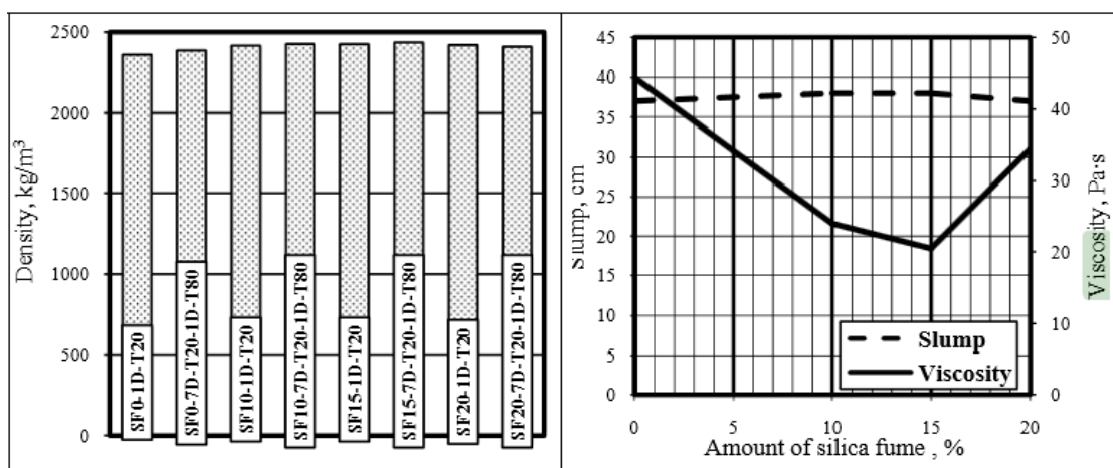
Jejich hlavní výhodou je vázání volného vápna (hydroxidu vápenatého). Jak bylo popsáno, podíl CH v zhydatované maltě je značný (24 %) a účinek těchto příměsí je tedy velmi znatelný. Přeměnou CH na C-S-H gely dosahujeme kompaktnosti cementového kamene. Aby nebyl přeměněn téměř veškerý CH a zůstaly potřebné 4 % na pasivaci výztuže, doporučuje se dávkování mikrosiliky pod 11 % hmotnosti cementu. Mikrosilika zlepšuje další vlastnosti betonu jako je odmísení, bleeding, čerpatelnost a eliminace tranzitní zóny. Díky své jemnosti vyplňuje také mezery mezi zrny cementu. Nevýhodou použití mikrosiliky je zvýšená potřeba vody (asi 1 l na 1 kg příměsi).<sup>[11][24]</sup>

**Vliv na hydrataci cementu a konzistenci (viskozitu) betonu** - Autor [32] zkoušel vliv mikrosiliky na UHPC s cementem CEM I 52,5 R, křemenným pískem s maximálním zrnem 2 mm a plastifikátorem na bázi PCE. Přidán byl také křemenný prášek jako filler, od jehož množství se odvíjela (procentuálně z jeho hmotnosti) dávka mikrosiliky (viz tabulka 6).

Composition	Amount of silica fume, %	Water, l	Cement, kg/m <sup>3</sup>	W/C	Micro filler, kg/m <sup>3</sup>		Quartz sand, kg/m <sup>3</sup>	Super plasticizer, l
					Silica fume	Quartz powder		
SF0	0				-	511		
SF10	10	224	735	0.30	74	438	962	36.75
SF15	15				110	401		
SF20	20				147	364		

Tabulka 7: Složení zkoušených receptur s mikrosilikou<sup>[32]</sup>

Cílem experimentu bylo zjištění optimální dávky mikrosiliky nahrazením filleru z 0, 10, 15 a 20 % mikrosilikou. Záměsi betonu byly ošetřovány při laboratorní teplotě (ozn. T20) a při teplotě 80°C (ozn. T80) v prvních 24 hodinách. Jedním z kritérií pro určení vhodné dávky byla viskozita směsi, která byla měřena metodou pádu kuličky. Autor uvádí, že nejvhodnější (nejnižší) viskozity lze pravděpodobně dosáhnout nejlepším rozdělením velikosti zrn složek při nejvyšší objemové hmotnosti. Zajímavé také je, že sednutí bylo téměř konstantní u všech záměsí, kdežto viskozita se měnila výrazně. Autor uvádí nejvíce vyhovující směs s 15% nahrazením filleru za mikrosiliku.

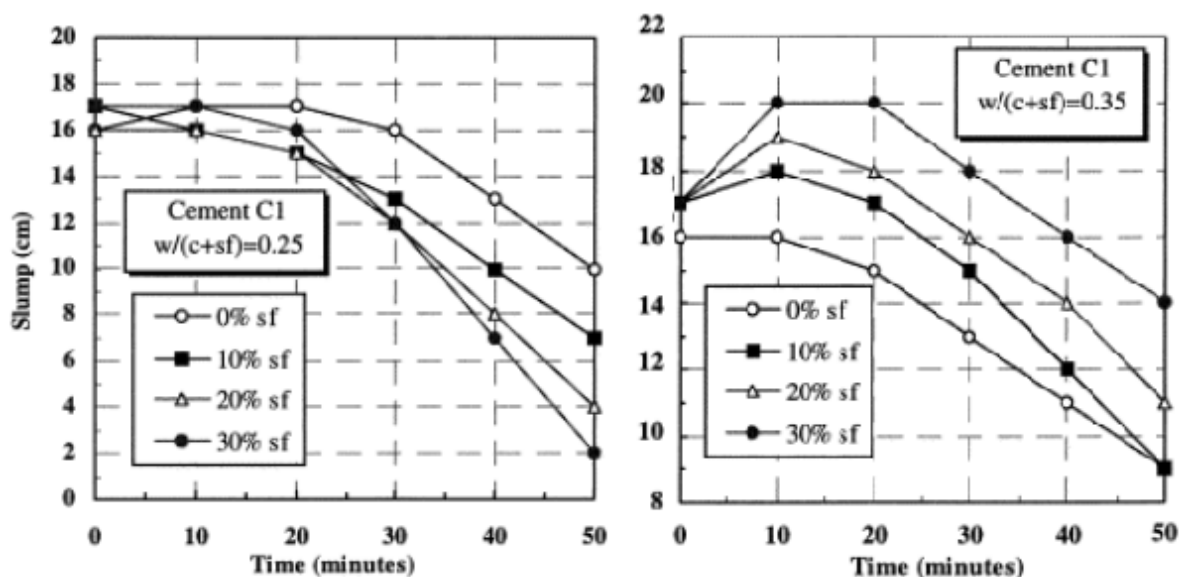


Graf 14 a 15: Vliv množství mikrosiliky na  $D_{cb}$ , viskozitu a sednutí kužele<sup>[32]</sup>

Rentgenovou difrakční analýzou byl zjišťován vliv mikrosiliky na hydrataci. Byl dokázán známý fakt, že použitím mikrosiliky jako příměsi, dojde k přeměně portlanditu na C-S-H. K největší transformaci hydrátů došlo u směsí s 20 % příměsí mikrosiliky, avšak v některých případech by naměřené hodnoty u této receptury nevyhovovali našim požadavkům. Důvodem je, že u T20 kleslo množství portlanditu z 11,9 % na 3,7 % a v případě T80 na hodnotu 0,5 %. Jak bylo zmíněno, v případě vyztužených prvků je pro pasivaci výztuže potřeba, aby bylo zastoupení portlanditu alespoň 4 % z hmotnosti všech hydrátů.

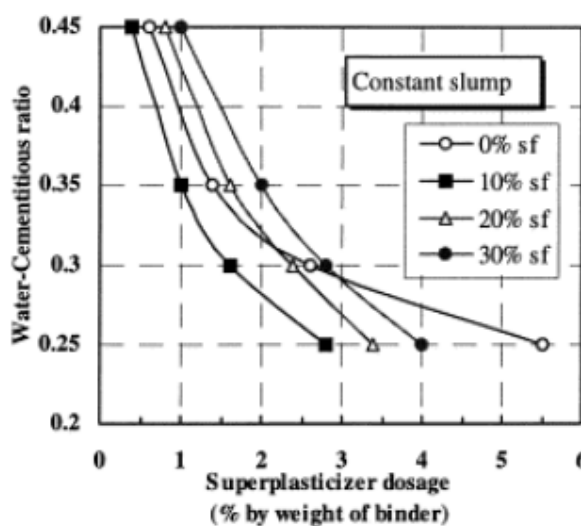
**Vliv vodního součinitele (voda/pojivo) na konzistenci** – pro beton s mikrosilikou

zjišťoval autor [33] na hodnotách sednutí kužele. Zjistil, že při hodnotě voda/pojivo = 0,25 klesala zpracovatelnost (hlavně v průběhu času tuhnutí) betonu s množstvím přidané mikrosiliky. V případě vodního součinitele  $w = 0,35$  byl tento jev opačný.



Graf 16: Vliv hodnoty voda/pojivo na sednutí kužele<sup>[32]</sup>

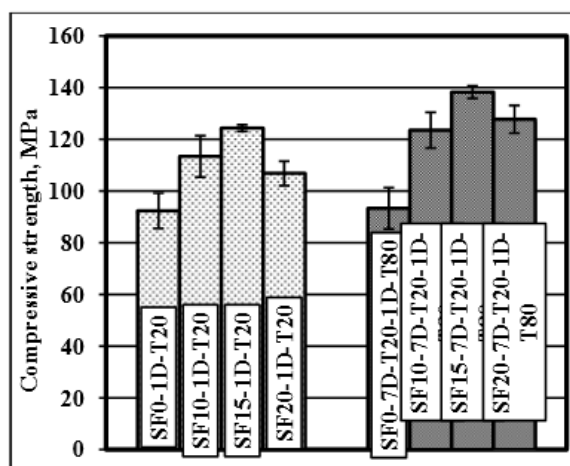
**Vliv na dávku plastifikátoru** – Autor také zjistil, že přidáním mikrosiliky lze dosáhnout stejné hodnoty sednutí kužele za použití nižšího množství superplastifikátoru u receptur s mikrosilikou. To dokazuje dobrý vliv na dispergaci cementových zrn, zvláště u hodnoty voda/pojivo = 0,25.



Graf 17: Vliv dávky mikrosiliky na potřebné množství SP pro konstantní sednutí<sup>[33]</sup>

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Autoři [32] a [33] došli ke stejnému závěru, že nahrazením filleru nebo cementu mikrosilikou, lze dosáhnout vyšších pevností betonu v tlaku. Optimální dávka mikrosiliky byla u zkoušek s nahrazeným fillerem 15 % a s nahrazeným

cementem 10 %, protože vyšší dávky způsobovaly snížení pevností. Zajímavý ([32]) byl také vliv teploty ošetřování v prvních 24 hodinách, kdy proteplovaný beton měl pevnost referenční směsi (bez MS) téměř stejnou, jako beton ošetřovaný při laboratorní teplotě, ale pevnosti betonu receptur T20 a T80 s použitím MS se výrazně lišily.



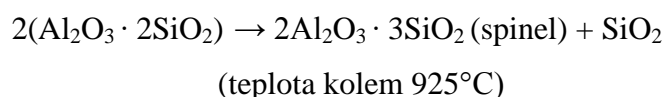
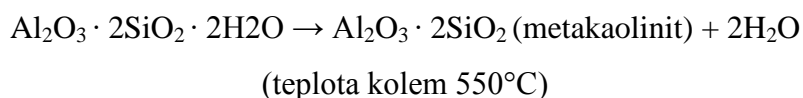
Graf 18: Vliv ošetřování a množství MS na pevnosti betonu v tlaku<sup>[32]</sup>

### 3.4 Metakaolin

Metakaolin je další z řady účinných pucolánů. Je klasifikovaný jako nová generace materiálů nahrazujících cement. Metakaolin nepatří mezi druhotný materiál, který vzniknul jako odpadní látka při různých procesech, ale vyrábí se přímo pro použití v cementových kompozitech.<sup>[35]</sup>

#### 3.4.1 Výroba metakaolinu

Metakaolin se vyrábí z kaolinového jílu tepelným zpracováním – kalcinací s určitým tepelným rozsahem. Tento proces vypudí z hlavní složky jílu (minerálu kaolinitu) vodu a dojde k rozpadnutí materiálové struktury. Výsledným produktem je metakaolinit. Tento proces se nazývá dehydroxylace a může být popsán jednoduchou rovnicí:



Teplota při kalcinaci je obvykle 600 – 800 °C a má významný vliv na výsledné vlastnosti metakaolinu. Tato problematika je předmětem mnoha výzkumů, kdy je cílem vyrobit

nejaktivnější metakaolin. Teploty vyšší jak 900°C vedou ke krystalizaci a tak nižší reaktivitě.<sup>[35]</sup>

### 3.4.2 Vlastnosti metakaolinu

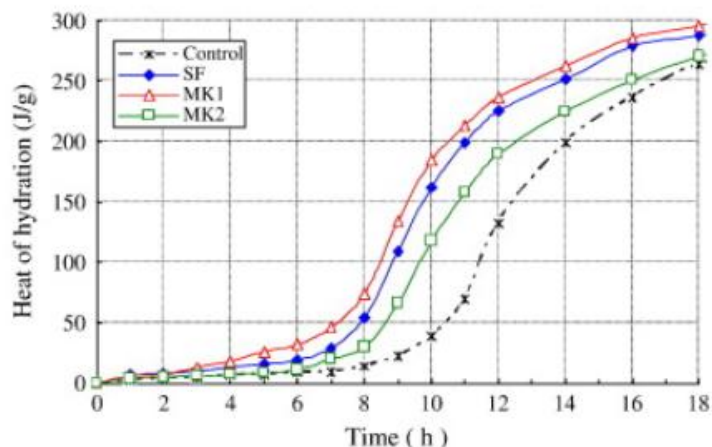
Měrný povrch kaolinu je kolem  $1200 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , velikost zrn je tedy větší než u mikrosiliky a menší než u cementu. Chemické složení, vyjádřené obsahem oxidů:  $\text{SiO}_2$  (51,34 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (41,95 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,52 %) a  $\text{CaO}$  (0,34 %). Ztráta žiháním je 0,72 %.<sup>[36]</sup>

#### 3.4.2.1 Vliv použití metakaolinu na vlastnosti vysokopevnostních betonů

Metakaolin ovlivňuje beton v mnoha aspektech, např. zvyšuje pevnost v tahu a tlaku, snižuje propustnost, zvyšuje chemickou odolnost a trvanlivost, redukuje efekt alkalicko-křemičité reakce, atd. Díky jeho jemnosti může vyplňovat mezery mezi zrny cementu. Metakaolin může částečně zhoršit zpracovatelnost, což se dá kompenzovat přidáním např. popílku.<sup>[37]</sup>

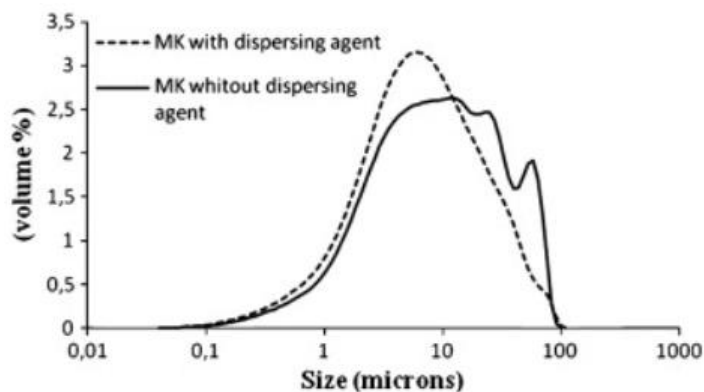
Metakaolinem nahrazujeme množství cementu v množství 10 – 15 % z jeho hmotnosti.

**Vliv na hydrataci** – Autor [38] srovnával hydratační teplo dvou různých metakaolinů, lišící se hlavně velikostí zrn. V grafu 19 je zobrazeno naměřené hydratační teplo, které prokazuje pucolánovou aktivitu jednotlivých metakaolinů – MK1 s jemnějšími zrny (propad sítem 10  $\mu\text{m}$  90 %) a MK2 hrubšími zrny (propad sítem 10  $\mu\text{m}$  40%). SF pro srovnání označuje mikrosiliku a Control referenční směs. Byl použit cement CEM 52,5, normový písek a superplastifikátor dávkovaný na konstantní rozlití 210 mm. Nejvyšší dávka SP byla nutná přidat k receptuře obsahující nejjemnější příměsi – MK1 a SF (Křemičité úlety redukují množství SP u nižšího vodního součinitele). Vodní součinitel konstantní voda/pojivo = 0,36. Dávka cementu referenční směsi byla  $680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , u receptur s příměsemi byla nahrazena  $68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  MK1, MK2 nebo SF.



Graf 19: Vliv metakaolinu na vývin hydratačního tepla<sup>[38]</sup>

**Vliv na konzistenci a deflokulace zrn** – Autor [39] prováděl rozsáhlý experiment vlivu velikosti vodního součinitele a dávce superplastifikátoru na reologických vlastnostech betonu s přidáním metakaolinu. Jako první udává důkaz o nutnosti použití disperzního činidla pro dokonalé rozptýlení velmi jemných částic metakaolinu v mikrostruktuře. Použil měřicí přístroj, který dokáže určit velikost i velmi jemným nanočásticím. V grafu 20 je uvedena křivka podílů jednotlivých velikostí zrn v navážce metakaolinu. Je jasné vidět, že bez použití disperzního činidla je zastoupení velikostí částic kolem 100  $\mu\text{m}$  zhruba 2 %, kdežto s aplikovaným disperzním činidlem kolem 0,5 %.

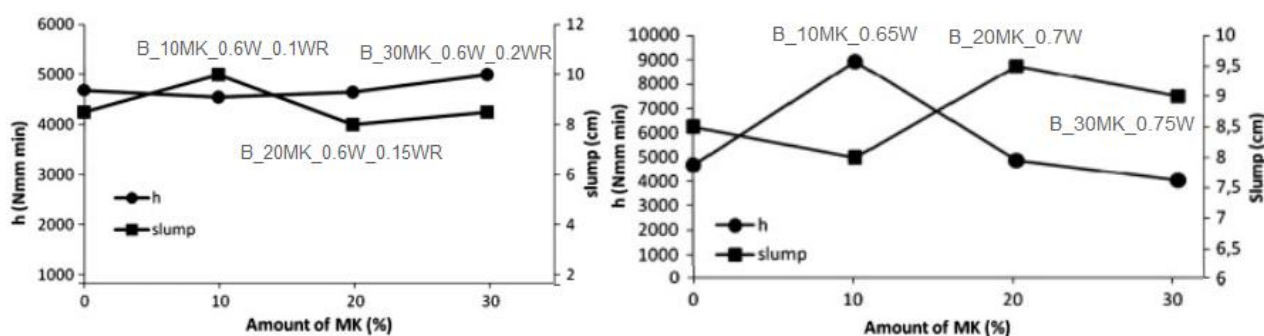


Graf 20: Vliv použití disperzního činidla na velikosti zrn metakaolinu<sup>[39]</sup>

Je tedy patrné, že bez použití podobné látky dochází ke shlukování zrn, které jsou poté méně reaktivní a jejich efektivní využití klesá. Podobné chování lze předpokládat i u mikrosiliky.

Autorovi se podařilo dokázat, že účinným disperzním činidlem, které zabrání flokulaci zrn, je superplastifikátor na bázi polykarboxylátů a to na klesajících užitečných vlastnostech betonu s použitím metakaolinu bez superplastifikátoru.

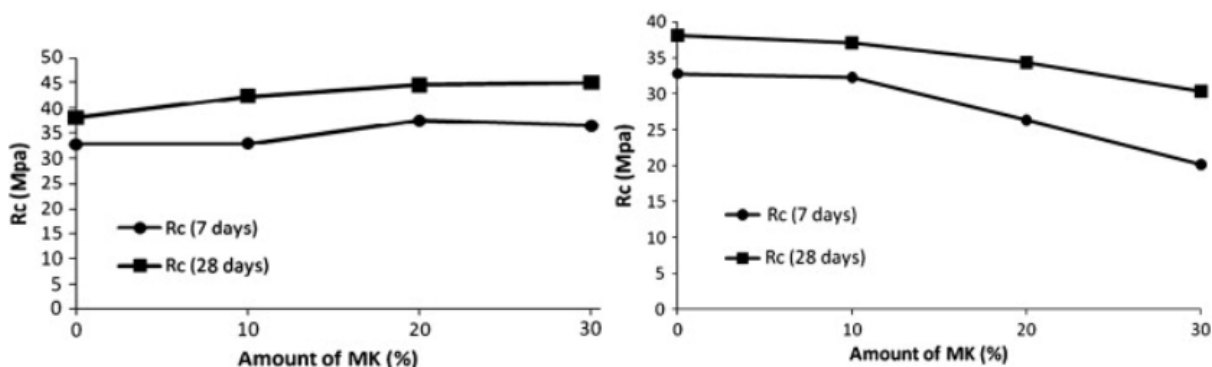
Reologické vlastnosti autor měřil pomocí viskozimetru a zkoušky sednutí kužele. Zkoušel jaké množství vody nebo SP je potřeba přidat k dosažení konstantního sednutí, podobnému referenční směsi ( $9 \pm 1$  cm), u betonu s přídavkem metakaolinu. V grafech 21 a 22 je uvedeno množství metakaolinu, vody, SP jednotlivých receptur a naměřené hodnoty. První číselná hodnota v názvu směsi udává množství nahrazeného cementu metakaolinem v procentech, druhá vodní součinitel (voda/pojivo) a v případě přidání SP udává třetí hodnota jeho množství procentuálním podílem z hmotnosti pojiva. V případě dosažení konstantního sednutí a konzistence pomocí změny vodního součinitele, bylo nutné k rostoucímu množství přidaného metakaolinu přidat i více vody. Viskozita jednotlivých směsí byla v tomto případě velmi rozdílná. S použitím superplastifikátoru (konstantní  $w = 0,6$ ) byla viskozita směsi téměř konstantní. S rostoucím nahrazením cementu metakaolinem rostla i dávka superplastifikátoru. V závěru lze tedy říci, že použitím metakaolinu klesá zpracovatelnost. Tento fakt lze do jisté míry účinně kompenzovat použitím superplastifikátoru v dávce závislé na množství metakaolinu.



Graf 21 a 22: Vliv použití SP na viskozitu a sednutí kužele<sup>[39]</sup>

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Stejný autor zkoušel u stejných receptur i pevnosti v tlaku. Zjistil, že se vzrůstajícím množstvím metakaolinu ve směsi roste i její pevnost, avšak tato skutečnost nastala jen v případě při použití superplastifikátoru pro dosažení potřebné zpracovatelnosti. V případě použití více vody pro lepší zpracovatelnost pevnost v tlaku klesala. Důvodem je, že dochází k flokulaci zrn metakaolinu a k výše uvedeným negativům s tímto spojeným. Dalšími důvody jsou, také již zmíněné, nežádoucí vlastnosti směsi s vyšším vodním součinitelem. Výsledné pevnosti s použitím SP jsou uvedeny v grafu 23, bez SP v grafu 24.





Graf 23 a 24: Výsledné pevnosti v tlaku s/bez SP<sup>[39]</sup>

### 3.5 Mikromletý vápenec

Před rokem 1980 byl vápencový prášek klasifikován jako inertní příměs, kdežto poslední studie dokazují spolupůsobení a reakce se složkami cementu. Jeho použitím lze urychlit hydrataci minerálu  $C_3S$  a měnit poměr  $Ca/Si$  v C-S-H gelu. Nevykazuje pucolánové vlastnosti.<sup>[42]</sup>

#### 3.5.1 Výroba jemně mletého vápence

Mletí vápence lze provádět více způsoby. Protože jeho vlastnosti jsou velice ovlivněny velikostí a tvarem zrn, je způsob mletí vápence předmětem mnoha výzkumů. Jako velmi účinný způsob se projevilo mletí pomocí tzv. tryskového mlýna, kterým lze získat zrna o velikosti  $10\ \mu m$  s plynulou křivkou zrnitosti. Nevýhodou tohoto způsobu mletí je velká energetická náročnost. Zrna pod velikost  $10\ \mu m$  lze získat i pomocí drcení vápence. Pokud je vápenec součástí cementu, melou se tyto složky společně.<sup>[44]</sup>

#### 3.5.2 Vlastnosti jemně mletého vápence

Chemické složení rozděluje vápenec do tříd jakosti I. – VIII., kdy nejlepší I. třída obsahuje nejvíce  $CaCO_3$  98 % a nejhorší 75 %. Dále vápenec obsahuje malé podíly  $MgCO_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$  a  $SO_3$ . Podle velikosti krystalů (pro použití jako příměs) rozdělujeme vápenec na mikrokrytalický (0,005 - 0,05 mm) a kryptokrytalický (< 0,005 mm).<sup>[44]</sup>

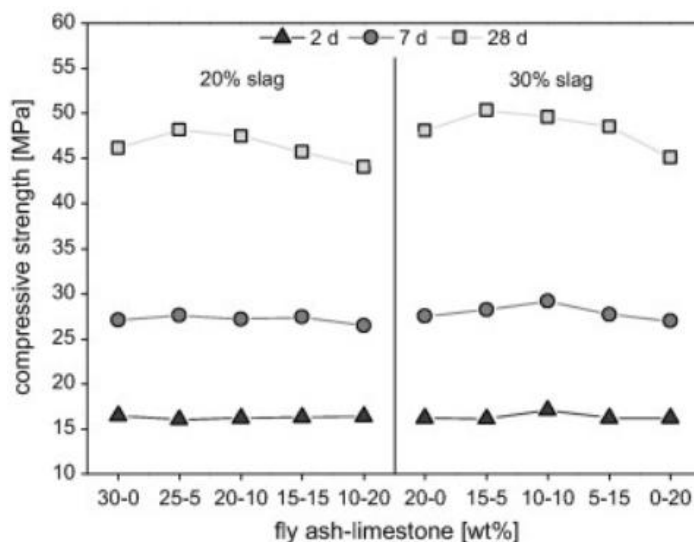
#### 3.5.3 Vliv použití jemně mletého vápence na vlastnosti vysokopevnostních betonů

Mletý vápenec jako příměs přispívá k lepší zpracovatelnosti a vyšším počátečním pevnostem. Plní funkci filleru, ale účastní se i hydratačních reakcí, které ovlivňuje.

V přítomnosti vápence, uhličitě ionty působí na hlinité složky ( $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) z portlandského cementu a vytváří karbo-alumináty, což vede k vyšším pevnostem. Obsah hlinitých složek v cementu je však omezený a při vyšších dávkách vápence lze tento fakt kompenzovat přidáním např. popílku nebo strusky jako další příměsi.<sup>[55]</sup>

**Vliv na hydrataci** – Autor [55] měřil vliv velikosti částic vápence na průběh hydratace cementové pasty. Použil vápenec o střední velikost 5 a 20  $\mu m$ . Množství nahrazeného cementu vápencem bylo 5, 10, 15 a 30 % a referenční malta byla bez příměsi. Pomocí kalorimetru měřil vývin hydratačního tepla a zjistil, že částice o velikosti 5  $\mu m$  zvyšují počáteční hydratační teplo ve všech uvedených množstvích. Zvýšila se také hranice maximálního vývinu tepla s použitím vápence do 15 %. V případě použití vápence se zrny o velikosti 20  $\mu m$  byl vývin tepla velmi podobný jako u referenční záměsi, ale maximální hodnota se snížila. Pokud by měl být vápenec použit pro zvýšení počátečních pevností, mělo by se dbát na jemnost jeho frakce.

**Vliv na konzistenci a pevnosti v tlaku** – Autor [56] zkoušel pevnosti v tlaku betonu s cementem nahrazeným z 50 % příměsemi – popílkem, vysokopecní struskou a mletým vápencem. Hledal nejvhodnější poměr mezi těmito složkami k dosažení nejvyšších pevností. Jak je patrné z grafu 25, nejvyšších konečných pevností bylo dosaženo s obsahem strusky 30 %, 15 % popílku a 5 % vápence.



**Graf 25: Vhodný poměr příměsí a jeho vliv na pevnosti betonu v tlaku<sup>[56]</sup>**

Autoři zkoušející vlivy použití vápence na vlastnostech betonu došli ke stejnému závěru, že s rostoucí dávkou mletého vápence roste i zpracovatelnost zkoušené směsi při konstantním vodním součiniteli.

## 3.6 Nanosilika

Nanosilika je pucolánová příměs, která obsahuje téměř 100% podíl  $\text{SiO}_2$  a vykazuje se vysokým měrným povrchem.

### 3.6.1 Výroba nanosiliky

Výroba této příměsi lze provést několika způsoby, nejčastěji pak způsobem, založeným na metodě sol-gel, za pokojové teploty. Křemičitan sodný (tavenina písku se sodou – vodní sklo) se spolu s některým zástupcem organokovových sloučenin (např. TMOS nebo TEOS) přidá do rozpouštědla, kdy vzniká vysrážený silika gel. Ten se filtruje a po odstranění rozpouštědla vzniká xerogel, který se vhodným způsobem vysuší. Poté je opět rozpuštěn ve stabilizačním činidle ( $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{NH}_3$ , atd.) za vzniku disperze o zastoupení tuhé látky 20 – 40 %.

Dalším možným způsobem je využití obloukové pece, pro vypařováním siliky při teplotě 1500 – 2000 °C redukcí křemene.<sup>[45]</sup>

### 3.6.2 Vlastnosti nanosiliky

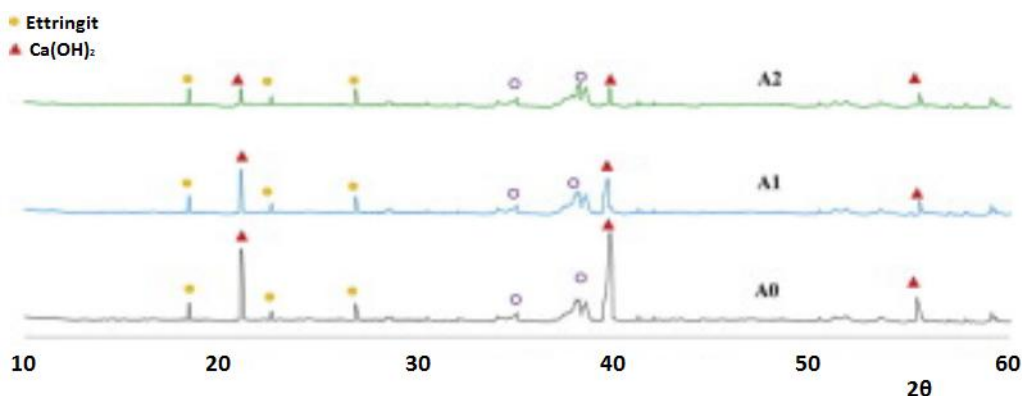
Nanosilika obsahuje více než 99,9 %  $\text{SiO}_2$  a vyznačuje se velkým měrným povrchem a malými nano částicemi. Například níže popsané experimenty byly provedeny s využitím nanosiliky s měrným povrchem  $160 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  a velikosti částic 16 nm. Obecně má nanosilika střední průměr zrn 7 – 40 nm a měrný povrch 30 – 300  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Sypná hmotnost je 2,20  $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ <sup>[46][11]</sup>

### 3.6.3 Vliv použití nanosiliky na vlastnostech UHSC

Jemnost nanosiliky lze dobře využít k vyplnění prostoru mezi zrny cementu a dalších jemných podílů v betonu. To vede k vyšší kompaktnosti a trvanlivost. Díky její vysoké pucolanitě, lze přeměnit více portlanditu na únosný C-S-H gel, než u mikrosiliky.

**Vliv na přeměnu CH fáze** – Autor [46] prováděl experiment, ve kterém srovnával množství přeměněného portlanditu s přidáním mikro a nanosiliky. Pomocí rentgenové difrakční analýzy zkoumal 3 cementové pasty s nízkým vodním součinitelem  $w = 0,2$ . Cement nahradil z 3 % mikrosilikou (ozn. A1) a z 3 % nanosilikou (ozn. A2). V grafu 26 je vidět, že úbytek portlanditu je značný v obou případech přítomnosti siliky a v případě nanosiliky ještě větší. Po 90 dnech hydratace, v případě použití nS, bylo

spotřebované množství  $\text{Ca(OH)}_2$  89 %, což bylo o 5 % více než při použití mikrosiliky. Tyto výsledky byly získány pomocí termogravimetrie, která je podle autora pro tyto účely přesnější.



Graf 26: Vliv použití mikro a nanosiliky na spotřebu  $\text{CH}^{[46]}$

**Vliv na konzistenci** – Stejný autor měřil vliv množství nahrazeného cementu nanosilikou v kombinaci s mikrosilikou na konzistenci betonu. Jako jemné kamenivo použil křemičitý písek o max. velikosti zrna 0,6 mm. SP byl na bázi PC. V tabulce 8 jsou uvedeny jednotlivé receptury a výsledky zkoušek. Pomocí porozimetru byla měřena i celková pórovitost, která v nejvyšším rozdílu klesla o 2 %. Ztráta zpracovatelnosti, která je důsledkem přidání ultra jemných částic do betonu, má v tomto případě kladný dopad co se týče kompaktnosti a dalo by se předpokládat, že přidáním nS lze zabránit bleedingu a segregaci.

Sample	Cement	SF	nS	Sand	Water	SP	Slump (mm)	Water absorption (%)	MIP test	
									Total porosity (%)	Capillary pores (%)
M0 (control)	950	255	–	873	189	31	193	1.212	6.35	2.65
M1	941.5	255	9.5	873	189	31	191	1.110	4.74	2.56
M2	932	255	19	873	189	31	184	0.95	4.66	2.44
M3	921.5	255	28.5	873	189	31	181	0.808	4.3	1.72
M4	912	255	38	873	189	31	174	0.856	4.8	2.33

Tabulka 8: Receptury a výsledky zkoušek vlivu množství nS v UHSC<sup>[46]</sup>

Autor [47] měřil zkouškou rozlitím konzistenci cementové pasty s nS a popílkem. U receptur, které obsahovaly určité množství nS (1 – 8 % z cementu), bylo nutné přidat určitou dávku SP, rostoucí s množstvím nS, aby bylo dosaženo podobných hodnot rozlití jako u směsí, které obsahovaly pouze popílek (40 – 70 % z cementu). Při kombinaci nS

a popílku došel autor k závěru, že přidáním popílku lze kompenzovat ztrátu zpracovatelnosti směsí obohacenými nS, protože hodnoty rozlití rostly s dávkou popílku (dávka nS byla konstantní) a byly vyšší než u referenční receptury.

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Autor [46] a [47] došli ke stejnému závěru, že pevnost betonu v tlaku s přidáním nanosiliky roste. V experimentu [46] byla nanosilika kombinována s konstantním množstvím mikrosiliky. Jednotlivé receptury jsou uvedeny v tabulce 8. Nejvyšších pevností v tlaku dosahoval beton, u kterého byl cement nahrazen z 3 % nS (receptura M3). V případě [47] autor dosáhl nejvyšších pevností s 2% nahrazením cementu nS, které byly vyšší, než pevnosti cementového kamene s cementem nahrazeným ze 40 % popílkem. Při srovnání pevností s použitím pouze popílku a pevností s použitím popílku + nS, byl v druhém případě zaznamenán mírný nárůst pevností.

### **3.7 Nanocement**

Nanocement je zástupcem nanočástic, které vstupují do betonu přímo jako pojivo. Nanocement lze vyrobit více způsoby.

#### **3.7.1 Výroba chemicky syntetizovaného nanocementu**

Nanocement vyrobený tímto způsobem obsahuje převážně sloučeniny křemíku a hliníku. Zpočátku se smíchá křemičitá fáze (gel s vysokou objemovou hmotností) a hlinitá fáze (gel s nízkou objemovou hmotností) za vzniku sodné a/nebo vápenaté hlinito-křemičité sloučeniny, která je po vysušení (100 °C) velmi pevná. Vzhledem k tomu, že částice takto vyrobeného cementu nejsou reaktivní, je třeba použít alkalický aktivátor, např. roztok NaOH.<sup>[48]</sup>

#### **3.7.2 Výroba jemně mletého nanocementu**

Dosažení rozměrů částic zrn obyčejného cementu v rozmezí desítek až stovek nanometrů lze pomocí planetárního kulového mlýna, který použil autor [57] pro mletí směsného a pucolánové cementu. Mlýn drtí částice pomocí ocelových kuliček, které vlivem rotačního pohybu rozbijí zrna cementu o stěny mlecího tělesa. Celý proces využívá odstředivou sílu, která je dvacetkrát větší než gravitační zrychlení a dokáže vyvolat velké množství energie, potřebné k dostatečnému mletí cementových zrn.

### 3.7.2 Vlastnosti nanocementu

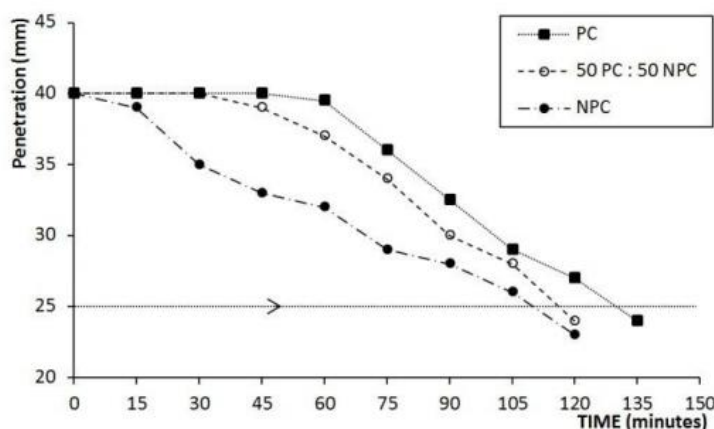
Syntetický nanocement, který byl použit u zkoušek popsanych níže [58] měl tyto vlastnosti: Velikost zrn 168 nm, měrný povrch  $3\,582\,400\text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ , největší zastoupení měl oxid  $\text{SiO}_2$  (42,8 %), dále  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (21,9 %) a  $\text{CaO}$  (3,71 %).

Chemické složení jemně mletého nanocementu záleží na složení původního cementu. Autor [57] dokázal výše popsaným způsobem získat zrna o velikosti desítek nm.

### 3.7.3 Vliv použití nanocementu na vlastnosti betonu

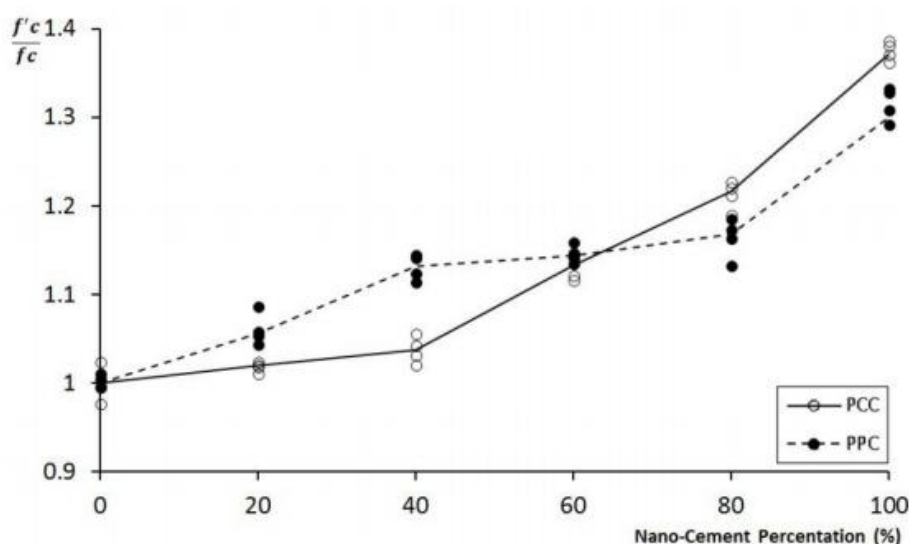
**Vliv na konzistenci, počátek a konec doby tuhnutí** – Autoři zkoušející chemicky syntetizovaný a mletý nanocement neuvádí žádný výrazný vliv na konzistenci malty. Zajímavé je srovnání počátku a konce doby tuhnutí, který byl u uměle vyrobeného cementu [58] vyšší než u referenční malty. Počátek doby tuhnutí malty vyrobeného z portlandského cementu byl 210 minut a konec 300 minut, kdežto malty tvořené chemickým nanocementem (50 % NaOH) byl interval tuhnutí 230 – 540 minut. Tyto hodnoty byly naměřeny při teplotě  $30^\circ\text{C}$ . Se zvyšující se teplotou klesala hodnota obou časů v případě vzorků s nanocementem (s OPC neměřeno), což dokazuje výrazný vliv teploty na hydrataci chemicky syntetizovaného nanocementu. Při teplotě  $60^\circ\text{C}$  byl interval počátku a konce doby tuhnutí 22 – 27 minut.

Zkoušený jemně mletý nanocement [57] naopak počátek doby tuhnutí zkracoval. Výsledek měření penetrace pomocí Vicatova přístroje je uveden v grafu 27. Označení PC znázorňuje maltu bez nanocementu, 50 PC : 50 NPC maltu s 50% nahrazením obyčejného cementu nanocementem a NPC maltu tvořenou pouze z jemně mletého portlandského cementu.



Graf 27: Vliv nanocementu na průběh tuhnutí malty<sup>[57]</sup>

**Vliv na pevnosti v tlaku** – Oba autoři měřili pevnosti v tlaku na tělesech 50x50x50 mm. Autor [58] hledal optimální dávku vody, jemného kameniva a alkalického aktivátoru pro získání nejvyšších pevností malty tvořené nanocementem vytvořeným chemickou cestou. Nejvyšší naměřenou pevnost v tlaku po 7 dnech autor uvádí 54 MPa, oproti referenční 38 MPa. Autor [57], který testoval vliv množství mechanicky mletého nanocementu (nahrazováním cementu s normální velikostí zrn) v maltách vyrobených ze směsného portlandského cementu a z pucolánového cementu. Malta obsahovala 500 g cementu, 1350 g normového písku a vodní součinitel byl  $w = 0,485$ . Mletý nanocement měl stejný původ a složení jako cement který nahrazoval. V grafu 28 je zobrazen vliv množství nanocementu na pevnosti v tlaku po 28 dnech poměrem pevnosti v tlaku malty s nanocementem  $f'_c$  ku pevnosti v tlaku malty referenční bez nanocementu  $f_c$ . Křivka PCC zobrazuje průběh pevností portlandského směsného cementu a PPC portlandského pucolánového cementu.



**Graf 28: Vliv množství nanocementu na pevnosti malt ze směsných a pucolánových cementů<sup>[57]</sup>**

### 3.8 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky (CNT) jsou považovány za jednu nejprínosnější armovacích přísad.

### 3.8.1 Výroba uhlíkových nanotrubiček

Vyrábět se mohou několika způsoby. Nejrozšířenější je metoda obloukového výboje. Mezi dvěma grafitovými elektrodami se generuje obloukový výboj v heliové (nebo argonové) atmosféře, kdy vzniká dostatečně velká teplota k sublimaci uhlíku. Ten se poté vysráží v podobě nanotrubiček.<sup>[49]</sup>

Další, dnes hodně používaný, způsob výroby je pomocí metody laserové ablace. Část uhlíku se vypařuje působením silného laseru (teplota kolem 1200 °C) v inertní atmosféře argonu. Poté se zase sráží v podobě nanotrubiček. Tímto způsobem je možno získat velmi kvalitní CNT.<sup>[49]</sup>

U obou výrobních procesů lze získat nanotrubičky buď jednotěnné nebo víceštěnné. Pro získání jednotěnných je nutno k výrobě přidat (buď na anodu, nebo v případě použití laseru na terčik s uhlíkem) kovový katalyzátor (kobalt nebo nikl).<sup>[49]</sup>

### 3.8.2 Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček

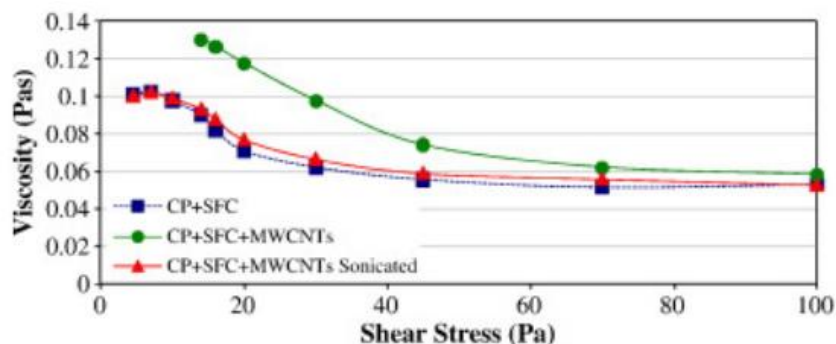
Délka a průměr CNT závisí na způsobu výroby a druhu trubiček (jednotěnné nebo víceštěnné). Jejich délka může být v řádu stovek mikrometrů a průměr se může pohybovat i kolem 1 nm. Vyznačují se vysokým Youngovým modulem pružnosti a vysokou pevností v tahu. Objemová hmotnost se pohybuje kolem 2 g·cm<sup>-3</sup><sup>[50]</sup>

### 3.8.3 Vliv použití uhlíkových nanotrubiček na vlastnostech betonu

Použitím CNT lze dosáhnout především výrazně vyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu nebo modulu pružnosti.

**Vliv na konzistenci – viskozitu** – Autor [51] pomocí reologických vlastností určoval vhodnou dispergaci jemných CNT v cementové maltě. Vycházel z teorie, že při dokonalější dispergaci částic bude viskozita směsi podobná referenční směsi bez jemných částic. Pro tento experiment použil dlouhé jednotěnné (MWCNT) uhlíkové nanotrubičky (délka 10 – 100 μm a průměr 20 – 40 nm). Pro srovnání jednu směs s CNT rozmíchal pomocí účinného ultrazvuku (viz graf 25 – ozn. CP+SFC+MWCNTsSonicated). Výsledky dokazují, že při dokonalém rozptýlení částic má přidání CNT jen nepatrný vliv na zpracovatelnost. U všech receptur byl aplikován tenzid pro zabránění shlukování.





**Graf 29: Vliv dispergace CNT v maltě na viskozitu směsi<sup>[51]</sup>**

**Vliv na pevnosti v tahu za ohybu a modul pružnosti** – Stejný autor zkoušel vliv množství přidaných CNT a jejich délek na vlastnostech zatvrdlého cementového kamene. Použité MWCNT měli stejný průměr 20 – 40 nm. Délka krátkých trubiček byla 10 – 30  $\mu\text{m}$  a délka dlouhých trubiček 10 – 100  $\mu\text{m}$ . Množství přidaných MWCNT bylo 0,08 % a 0,048 % z hmotnosti. Po 28 dnech hydratace, měli receptury s krátkými i dlouhými trubičkami o obsahu 0,08 % stejné pevnosti v tahu za ohybu, stejně jako dlouhé trubičky s obsahem MWCNT 0,048 %. Nejvyšší pevnosti (přesto však vyšší než referenční malta) měla tedy receptura s 0,048 % krátkými MWCNT. Pevnost v tahu za ohybu vzrostla o 25 %. Téměř totožné a nejvyšší naměřené hodnoty modulů pružnosti měly receptury krátkých MWCNT o obsahu 0,08 % a dlouhých MWCNT o obsahu 0,048 %. V tomto případě byl Youngův modul pružnosti větší o 45 %.

### 3.9 Nano-oxid hlinitý

Tato nano příměs byla předmětem pouze několika studií. Její největším přínosem bude nejspíše pozitivní vliv na trvanlivost.

#### 3.9.1 Výroba nano-oxidu hlinitého

Zajímavou technologii výroby prášku nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  zvolil autor [59], kdy pomocí metody exploze drátu vyráběl nano částice požadovaných rozměrů. Proces je založen na velmi prudkém elektrickém ohřevu tenkého hliníkového drátu, který se rozpadne na požadované částice.

#### 3.9.2 Vlastnosti nano-oxidu hlinitého

Velikost kulovitých částic je menší než 80 nm a měrný povrch menší než  $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je větší než 99 %.<sup>[52]</sup>

### 3.9.3 Vliv použití nano-oxidu hlinitého na vlastnostech betonu

Při nahrazení části cementové složky touto příměsí, dojde k reakci s CH fází, za vzniku C-A-S gelu. Aplikací nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  můžeme dosáhnout vyšších pevností a hlavně výrazně vyššího modulu pružnosti.

**Vliv na konzistenci** – Autor [53] měřil konzistenci betonu pomocí sednutí kužele. Pro srovnání nahrazoval cement z 0,5 %, 1 %, 1,5 % a 2 % nano-oxidem hlinitým. Jako drobné kamenivo byl použit písek s maximálním zrnem 0,5 mm a hrubé kamenivo drcený basalt s maximálním zrnem 15 mm. Vodní součinitel byl konstantní  $w = 0,40$ . Referenční směs bez nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  dosahovala hodnoty sednutí 80 mm. Již při nahrazení cementu 0,5 % příměsí klesla hodnota sednutí na 50 mm a při 2% nahrazení až na 20 mm. Bez použití účinného SP není tedy možné tuto příměs aplikovat při vhodné zpracovatelnosti.

**Vliv na pevnosti v tlaku a mrazuvzdornost** – Autor [54] srovnával pevnosti referenčního betonu bez příměsí, betonu s nanosilikou a betonu s nano-oxidem železitým. Počáteční pevnosti referenční receptury a směsi s nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , byly téměř totožné. Konečné pevnosti byly s použitím  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vyšší, ale pouze nepatrně. Této hodnoty bylo dosaženo s nahrazením cementu z 3 %. Nanosilika vykazovala mnohem vyšší pevnosti, avšak použití  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bylo výhodnější oproti nanosilice v problematice mrazuvzdornosti. Po 300 cyklech byl pokles pevnosti vzorku s nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  o 18 %, kdežto u vzorku s nanosilikou o 23 %. Referenční směs měla ztrátu pevnosti po 300 cyklech 100 %.

## 4 Dispergace nejjemnějších příměsí

Většina vzorků, které byly zkoušeny v popsáných experimentech, byla připravena běžným normalizovaným postupem, tedy i metoda míchání, respektive metoda dispergace jemných příměsí se nijak nelišila a v některých případech byla provedena pouze v kombinaci s plastifikační přísadou.

Autor, zkoušející vlastnosti malty s uhlíkovými trubičkami, dispergoval tuto nano příměs pomocí ultrazvuku (metoda ultrasonic). Ultrazvuk se do suspenze přenáší nejčastěji pomocí tzv. sonikátoru. Ultrazvukové vlny rozpohybují molekuly vody a poté dochází k oddělování jednotlivých nanočástic ve vzniklých shlucích, které se tvoří díky vysokému povrchovému napětí, rostoucí spolu s měrným povrchem. Toto napětí je třeba snížit kvůli dalšímu shlukování po ukončení míchání pomocí povrchově aktivních látek.<sup>[63]</sup>

## B Experimentální část

### 5 Cíl experimentu

Cílem praktické části bakalářské práce bylo zjištění vlivu přidání jemně mletého cementu do malt s množstvím cementu 320 a 550 kg·m<sup>-3</sup>, navrženými pro potřebnou konzistenci. Sledoval se hlavně vývoj pevností v tlaku a tahu za ohybu. Také byl sledován vliv jemného cementu na reologické vlastnosti cementové pasty. Dále byl otestován vliv vysokorychlostního míchání malty pomocí experimentální míchačky.

### 6 Použité materiály

Informace o použitých materiálech byly získány z technických listů, které poskytují výrobci daného produktu. Vlastnosti dodaného jemně mletého cementu byly změřeny dle uvedených postupů.

#### 6.1 Portlandský cement

Hlavní pojivovou složkou vstupující do malty byl portlandský cement CEM I 42,5 R, vyrobený společností Českomoravský cement a.s. (Mokrá).

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Pevnosti v tlaku 2 dny	30	MPa
Počátek tuhnutí	196	min
Měrný povrch	377	m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>
Chemické složení - prvek	Obsah [%]	
CaO	65	
SiO <sub>2</sub>	19	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	

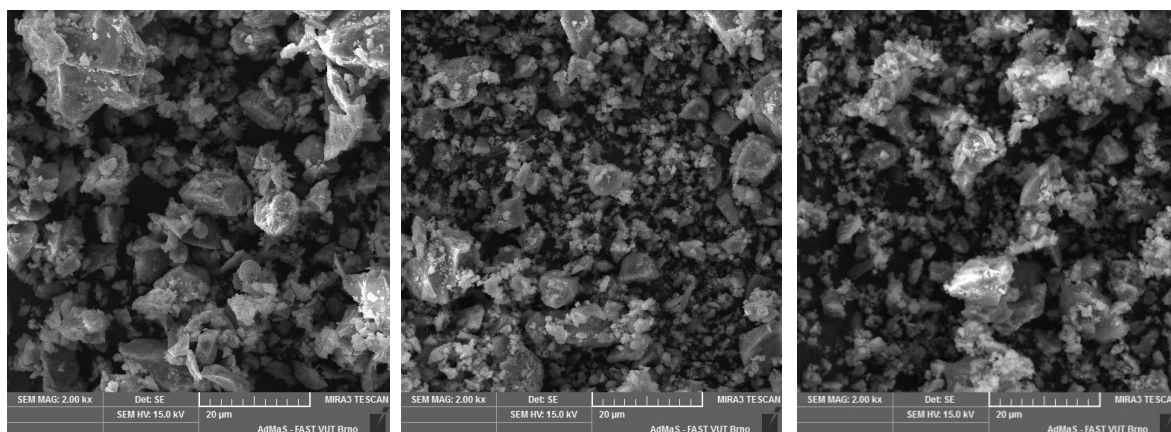
**Tabulka 9: Vlastnosti použitého portlandského cementu**

## 6.2 Jemně mletý portlandský cement

Jemně mletý cement byl experimentálním produktem.

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Pevnosti v tlaku 2 dny	35	MPa
Počátek tuhnutí	160	min
<b>Měrný povrch</b>		
Původně	456	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
Po mletí	569	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
<b>Chemické složení - prvek</b>	<b>Obsah [%]</b>	
CaO	66	
SiO <sub>2</sub>	19	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	

Tabulka 10: Vlastnosti použitého portlandského cementu



Obrázek 4: SEM snímky: Obyčejný cement, jemně mletý cement a domílaný cement

## 6.3 Plastifikační přísada

Při navrhování metodiky vhodné dispergace jemnějších cementů byla použita superplastifikační přísada Mapei Dynamon SX 14. Příklad je na bázi akrylových nesiřených polymerů.

## 6.4 Kamenivo a voda

Jako plnivo bylo použito kamenivo frakce 0 – 4 těžené pískovnou Žabčice a normalizovaný písek (na jeho použití u jedné ze zkoušek je upozorněno). Voda byla použita z vodovodního řádu.

## 7 Použité zařízení a jejich principy

### 7.1 Mastersizer 2000 – Laserová difrakce pro měření velikosti částic

Mastersizer 2000 je přístroj vyroben společností Malvern. Měření velikostí částic pomocí laserové difrakce je založeno na prozařování částic laserovým paprskem, který se v měřicí nádobě (kyvetě) rozptyluje. Vlivem přítomnosti částic dochází k ohybu (neboli difrakci) laserového paprsku a vzniklý úhel ohybu je nepřímo úměrný velikosti částic. Intenzita světla stanovená v různých směrech se vnáší do výpočtu distribuce částic. Výsledek měření je vyhodnocen podle teorie MIE (matematicko-fyzikální teorie rozptylu elmag. záření částicemi - Gustav Mie 1908).<sup>[60]</sup>

### 7.2 Laboratorní míchačka

Míchačka splňuje požadavky dle normy ČSN EN 196-1. Jednotlivé cykly se spínají automaticky. Přesněji jsou popsány v další kapitole v metodice míchání vzorků. Míchací lopatka je plochého tvaru.

### 7.3 Experimentální míchačka

Míchačka vyvinutá na ÚTHD – FAST VUT slouží pro experimentální účely hlavně v oblasti dispergace a aktivace jemných příměsí. Sestává se z válcové nádoby, hřídele s hvězdicovitými míchacími lopatkami a úchytného fragmentu. Vlastní pohon zajišťuje připevněná vrtačka, na jejíchž parametrech závisí celkový výkon míchání, počet otáček apod. V experimentu byla použita vrtačka s rychlostí otáček 3000 ot/min.



Obrázek 5: Sestava experimentální míchačky a detail míchacích lopatek

## 7.4 Viscomat NT – Viskozimetr pro měření konzistence pasty

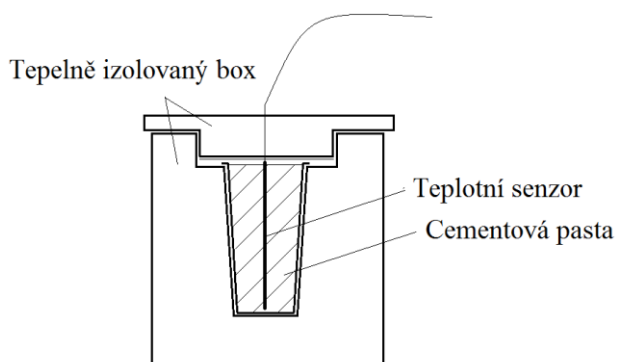
Viscomant NT vyrábí firma Schleibinger Gerate. Je možné měřit vzorky s maximálním zrnem 2 mm při zadané teplotě a rychlosti otáček (rozsah 0,001 – 200 ot/min). Stanovení konzistence v čase je provedeno pomocí otočného momentu, který je možné měřit do  $\pm 200$  Nmm. U tohoto modelu se otáčí nádoba se zkoušeným vzorkem a namáhaná lopatka je ve stálé poloze. Nádoba se vzorkem je umístěna ve vodní lázni s chladicí kapalinou, která je temperována na požadovanou teplotu.



Obrázek 6: Schéma Viskozimatu NT a snímek v průběhu měření

## 7.5 Soustava pro měření vývinu hydratačního tepla

Soustava je složená z izolovaných boxů, do kterých se umístí vzorky cementové pasty v samostatných nádobách, teplotních čidel a klimatizační komory. Teplotní čidla jsou napojena do počítače se softwarem vyhodnocující naměřené teploty v časovém intervalu 2 minuty.



Obrázek 7: Řez měřicí soustavou a snímek vzorků po ukončení měření

## 8 Pracovní postupy

### 8.1 Laserová difrakce

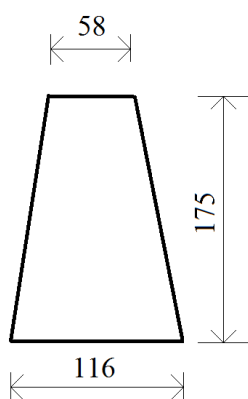
Cílem laserové difrakce bylo zjištění granulometrie dodaného jemně mletého cementu a porovnání s referenčním obyčejným portlandským cementem. Dále byla sledována účinnost domílání pomocí kulového mlýna, opět porovnáním křivek zrnitosti všech použitých cementů. Měření bylo provedeno ve vodném prostředí jednak s aktivovaným ultrazvukovým rozmícháním a jednak bez jeho aplikace. Předpokládalo se možné pozorování tendence jemnějších cementů ke shlukování nejmenších zrn.

### 8.2 Mletí jemného cementu

Na základě výsledků laserové difrakce bylo navrženo dodaný cement domlít pro získání vhodnější granulometrie. Mletí bylo provedeno v kulovém mlýně rychlostí 1000 ot/min po dobu dvaceti minut.

### 8.3 Způsob návrhu receptur, míchání a příprava vzorků

Receptury malt byly navrženy na požadovanou hodnotu rozlití kužele (viz obrázek 13 a 14) 300 mm. Malta s touto konzistencí by teoreticky měla vyhovovat požadavkům při výrobě SCC, případně HSSCC.



**Obrázek 8: Schéma použitého kužele (mm) a snímek rozlití malty**

Zkouška rozlitím kužele byla provedena naplněním kužele v jedné vrstvě bez hutnění a následném zvednutí. Měřily se dva na sebe kolmé průměry rozlití.



Protože však malty s  $320 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  cementu (vzhledem k menšímu množství jemných podílů) vykazovaly při této konzistenci známky bleedingu, snížil se u nich požadavek rozlití na hodnotu 170 – 200 mm, stanovenou pomocí střešacího stolku.

Jemně mletý a domílaný cement se přidával v dávkách 10 a 30 kg k dané receptuře. Konzistence malty se po přidání jemně mletého cementu neměnila, proto vodní součinitel zůstává konstantní i po přidání jemného cementu. Množství kameniva bylo dopočítáno pomocí rovnice absolutních objemů.

### 8.3.1 Značení vzorků a navržené receptury pro pevnostní zkoušky

V další kapitole jsou popsány způsoby míchání vzorků. Tabulka 9 uvádí značení jednotlivých vzorků v závislosti na způsobu míchání a druhu přidaného jemného cementu. První číslo v označení udává množství obvyčejného portlandského cementu a druhé množství přidaného jemného cementu, případně % nahrazení cementu.

Rychlost otáček (způsob míchání) [ot./s]	Označení
285 (normové)	N
3000 (experimetální)	R
Měrný povrch přidaného cementu [m <sup>2</sup> ·kg]	
456	J
569	D

**Tabulka 11: Způsob značení vzorků**

Označení vzorku	Obyčejný cement	Jemný cement	Složka [g]			[mm]
			Mletý jemný cement	Písek	Voda	Rozlití
320_REF_N	320	-	-	1579	280	180
320_REF_R	320	-	-	1579	280	175
320_10_J_N	320	10	-	1579	280	180
320_30_J_N	320	30	-	1579	280	180
320_10_D_N	320	-	10	1579	280	175
320_30_D_N	320	-	30	1579	280	180
320_10_D_R	320	-	10	1579	280	175
320_30_D_R	320	-	30	1579	280	180
550_REF_N	550	-	-	1262	330	300
550_REF_R	550	-	-	1262	330	300
550_10_J_N	550	10	-	1262	330	300
550_30_J_N	550	30	-	1262	330	300
550_10_D_N	550	-	10	1262	330	300
550_30_D_N	550	-	30	1262	330	300
550_10_D_R	550	-	10	1262	330	300
550_30_D_R	550	-	30	1262	330	300

**Tabulka 12: Navržené receptury pro zkoušení pevností v tahu za ohybu a v tlaku**

Další receptury, vytvořené pro zkoušení metody dispergace jemného cementu, měly normové zastoupení složek. Při návrhu se měnilo pouze množství plastifikační přísady v závislosti na průměru rozlitého koláče, provedeného také pomocí střešacího stolku: Kovový kužel byl plněn ve dvou vrstvách, kdy každá byla hutněna deseti lehkými údery hutnicím dusadlem. Poté byl kužel zvednut. Deska byla zvedána rychlostí 1 zvednutí za sekundu celkem 15x. Poté se změřily dva na sebe kolmé průměry. Jako vyhovující se považoval průměr rozlití 150 – 180 mm.

Cílem kombinace vysokých otáček a použití plastifikátoru bylo dosažení lepší dispergace jemného cementu a tím zlepšení pevností zatvrdlé malty. Výsledky byly sledovány na maltách o normovém poměru vstupních složek, kdy byl obyčejný portlandský cement nahrazován domílaným cementem s měrným povrchem  $569 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$ . Nahrazení bylo provedeno z 5, 10, 15 a 20 %.

Označení vzorku	Složka [g]				[%] Plast. přísada	[mm] Rozlití
	Obyčejný cement	Jemný domletý cement	Písek	Voda		
450_REF_N	450	-	1375	225	1,25	220
450_REF_R	450	-	1375	225	1.25	160
450_05%D_R	428	22	1375	225	1.25	160
450_10%D_R	405	45	1375	225	1.25	155
450_15%D_R	382	68	1375	225	1.25	160
450_20%D_R	360	90	1375	225	1.25	155

**Tabulka 13: Navržené receptury pro ověření vhodnosti způsobu dispergace**

Na základě výsledků zkoušek měření viskozity v době 90 minut a hydratačního tepla v době 72 hodin byla navržena metoda zkoušení pevností malt po 3 dnech. Malty byly normového složení a obsahovaly písek normové granulometrie. Měřila se pevnost obyčejného portlandského cementu a dodaného jemně mletého cementu. Míchání bylo provedeno oběma způsoby (viz níže).

Označení vzorku	Složka [g]			
	Obyčejný cement	Jemný cement	Písek	Voda
450_CEM_N	450	-	1375	225
450_CEM_R	450	-	1375	225
450_J_R	-	450	1375	225
450_J_R	-	450	1375	225

**Tabulka 14: Navržené receptury pro zkoušení pevností po 3 dnech**

### 8.3.2 Míchání malty

Míchání vzorků označených N proběhlo dle normy ČSN EN 191-1 v míchačce s normalizovanými cykly:

Nízká rychlost 30s + přisypávání plniva 30s → Vysoká rychlost (285 ot/min) 30s → Doba klidu (včetně 15s stírání) 90s → Vysoká rychlost (285 ot/min) 60s

Míchání vzorků označených R proběhlo v experimentální míchačce. Vzhledem k velkému přetížení motoru vrtačky po přidání drobného kameniva, byla tímto způsobem rozmíchána pouze cementová pasta (cement + voda + případná plastifikační přísada). Kamenivo bylo do pasty přidáno a rozmícháno v normové míchačce s normovými cykly. Aby se eliminovala chyba v důsledku nedokonalého vyprázdnění experimentální míchačky,

namíchala se pasta v mírném nadbytku a poté se přesně odvážilo potřebné množství vytvořené pasty. Navržený cyklus míchání:

Nízká rychlost 15s → Vysoká rychlost (3000 ot/min) 120s → Doba klidu (včetně stírání dna a lopatek míchačky) 90s → Vysoká rychlost (3000 ot/min) 120s → Normové cykly

V případě vzorků s plastifikační přísadou se první etapa s nízkou rychlostí prodloužila o dalších 15s, kdy se rozmíchávala plastifikační přísada ve vodě již smíchané s cementem.

### 8.3.3 Výroba vzorků a způsob ošetřování

Po rozmíchání všech složek byly vyrobeny zkušební trámečky o rozměrech 160x40x40 mm pomocí ocelových forem. Jejich plnění proběhlo ve třech vrstvách za současně vibrace na vibračním stole v čase 2 minuty – v případě receptur s normovým poměrem složek. Malty s 320 kg·m<sup>-3</sup> cementu byly do formy vloženy v jedné vrstvě a vibrovány pouze 10s vzhledem k jejich měkké konzistenci. Vzorky s 550 kg·m<sup>-3</sup> cementu se rovněž nehnuly.

Odformování vzorků bylo provedeno po 24 hodinách a poté byly umístěny do vodního prostředí.

## 8.4 Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu

Pevnosti vzorků byly zkoušeny po 7 a 28 dnech zrání dle normy ČSN EN 196-1.

Před zkouškou byly vzorky otřeny vlhkou tkaninou, změřeny jejich rozměry a zváženy. Poté byla měřena pevnost v tahu za ohybu, kdy se vzorek vložil do zkušebního lisu osazeného přípravkem pro trojbodový ohyb (rozpětí dolních podpor bylo 100 mm, zatěžovací váleček působil uprostřed). Zatěžovalo se kolmo na směr zhutnění rychlostí 50 ± 10 N/s až do porušení vzorku. Odečetla se maximální zatížení  $F_t$  a po dosazení do uvedeného vztahu se stanovila pevnost v tahu za ohybu jednotlivých vzorků. Výsledek je průměr ze 3 hodnot, uváděny s přesností na 0,1 Mpa. Vztah pro výpočet:

	$f_{cf}$	.....	Pevnost v tahu za ohybu	[Mpa]
$f_{cf} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_t \cdot l}{b \cdot h^2}$	$F_t$	.....	Maximální zatížení do porušení	[N]
	$b$	.....	Šířka vzorku	[mm]
	$h$	.....	Výška vzorku	[mm]

Pevnost v tlaku byla změřena ve zkušebním lisu osazeným přípravkem pro zatěžování v tlaku s tlačnou plochou 1600 mm<sup>2</sup>. Zatěžovací rychlost byla 2400 ± 200 N/s a

zatěžovalo se až do porušení, kdy byla určena maximální síla při porušení  $F_c$  a dosazena do vztahu pro výpočet pevnosti v tlaku. Výsledek měření je průměr z šesti hodnot, poté zaokrouhlený na 0,1 Mpa. Vztah pro výpočet:

$$f_c = \frac{F_c}{1600}$$

$f_c$	.....	Pevnost v tlaku	[Mpa]
$F_c$	.....	Maximální zatížení do porušení	[N]
1600	.....	Zatěžovací plocha	[mm <sup>2</sup> ]

## 8.5 Měření viskozity

Cílem experimentu bylo zjištění vlivu přítomnosti dodaného jemného cementu v cementové pastě na její reologické vlastnosti. V tabulce 12 jsou uvedeny receptury, které byly rozmíchány pomocí buď normalizované míchačky, nebo experimentální míchačky s vysokými otáčkami. Obyčejný portlandský cement byl nahrazován z 25 % jemným i domílaným cementem. Vodní součinitel u všech receptur byl  $w = 0,4$ .

Označení vzorku	Složka [g]			
	CEM I	Jemný CEM	Domílaný CEM	Voda
REF_N	700	-	-	280
REF_R	700	-	-	280
25%J_N	525	175	-	280
25%J_R	525	175	-	280
25%D_N	525	-	175	280
25%D_R	525	-	175	280

**Tabulka 15: Receptury pro měření viskozity**

Po rozmíchání cementu s vodou byla naplněna válcová nádoba viskozimetru po rysku a osazena do zkušebního přístroje. Rychlost otáčení byla 60 ot/min, doba měření 90 minut a teplota prostředí (vodní lázně) 20 °C.

Výsledkem měření je graficky znázorněný průběh točivého momentu v čase.

## 8.6 Sledování vývinu hydratačního tepla

Pro sledování vývinu hydratačního tepla byly připraveny receptury o známé vhodné konzistenci (viz tabulka 13). Poté byly naplněny nádoby až po horní okraj a vloženy do izolovaných boxů. Byla osazena teplotní čidla a každý box umístěn do klimatizační komory s teplotou prostředí 20°C. Po 72 hodinách bylo ukončeno měření a vyhodnoceny výsledky, které udávají průběh naměřené teploty v čase.

Označení vzorku	Složka [g]			[ot/min]
	CEM I	Jemný CEM	Voda	Rychlost otáček
REF_N	490	-	176	285
REF_R	490	-	176	285
25%J_N	-	490	176	3000
25%J_R	-	490	176	3000

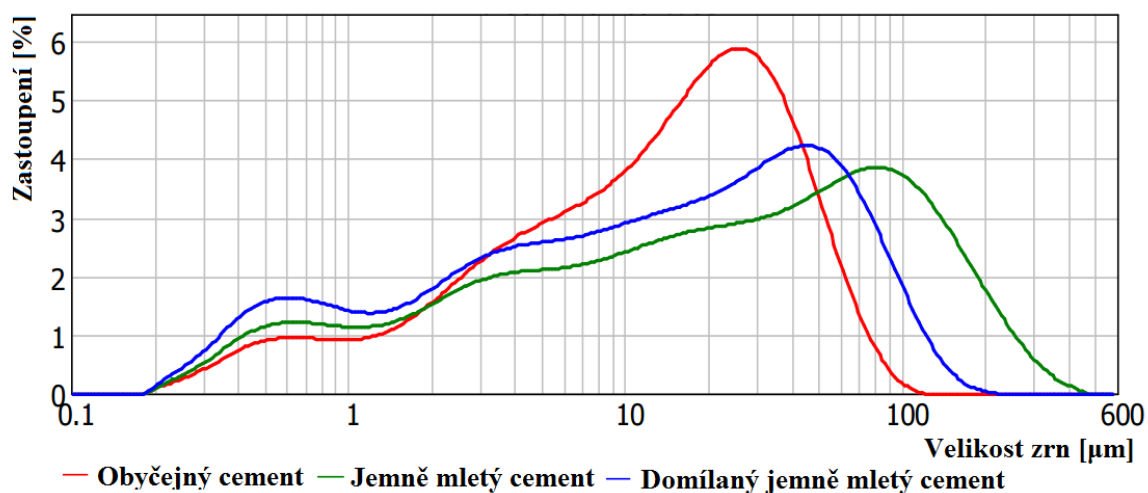
**Tabulka 16: Receptury pro měření vývinu hydratačního tepla**

## 9 Výsledky měření

Všechny výsledky měření jsou pro vhodné srovnání vyjádřeny také graficky. Možné příčiny jejich hodnot, stejně jako případné návrhy dalších postupů nebo změn zkušebních metod jsou komentovány v kapitole 11.

### 9.1 Laserová difrakce – měření granulometrie

Výsledky laserové difrakce dokazují ne příliš vhodné rozložení velikosti zrn jemně mletého cementu, který i po následném domílání stále obsahoval větší množství zrn s většími rozměry oproti obyčejnému portlandskému cementu. Zastoupení menších zrn bylo však větší.



**Graf 30: Granulometrie zkoušených cementů**

Při použití ultrazvuku pro rozptýlení zrn během měření byla výsledná křivka totožná s křivkou bez jeho aplikace.

### 9.2 Měření pevností

Po přidání jemných cementů do malt byly očekávány vyšší pevnosti, hlavně tedy pevnost v tlaku. Nejmenší zrna cementů měla vyplnit pórový systém cementového kamene, jak je popsáno v kapitole diskuze, a samotná jemnost mletí cementu měla zajistit (díky menším a reaktivnějším zrnům) vyšší pevnosti hlavně v prvních dnech zrání. Je možné sledovat určitý vzrůst pevností vlivem přidávání dalších podílů cementů. Rozdíly však nejsou tak výrazné, jak bylo původně předpokládáno, stejně jako v případě samotné jemnosti

přidávaných cementů, která byla pro tyto zkoušky požadována vyšší. Očekával se tedy vyšší podíl mnohem menších zrn, než dodaný jemně mletý cement obsahoval.

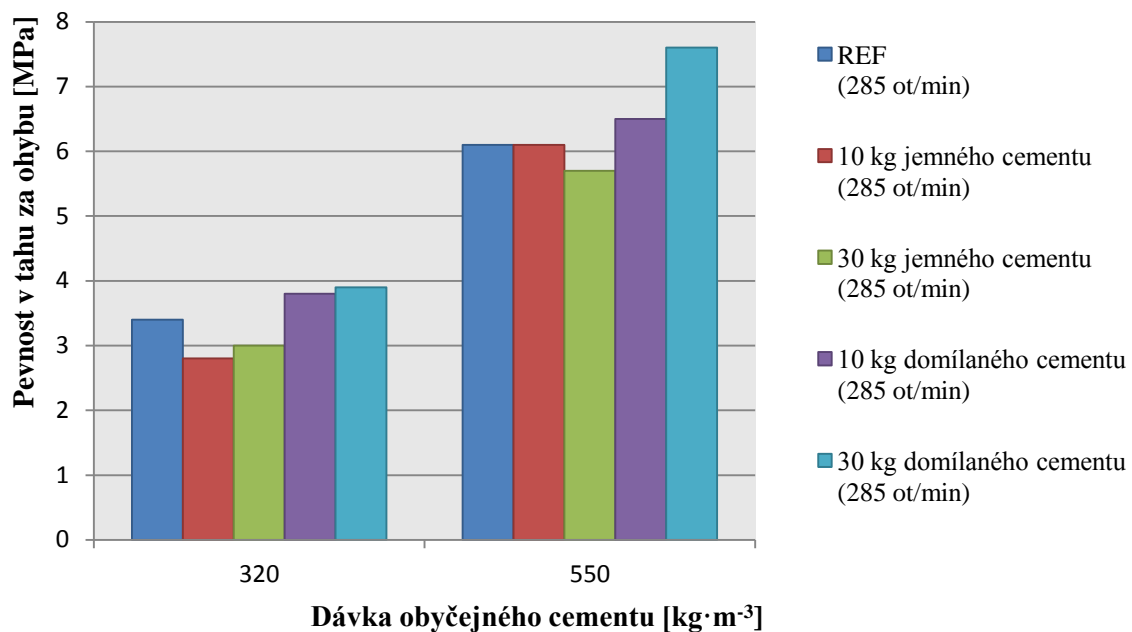
### 9.2.1 Srovnání vlivu přidání jemného/domílaného cementu a vlivu rychlosti otáček

Nejprve je porovnán vliv přidání jemného a domílaného cementu při normálních otáčkách, poté porovnávání vlivu rychlosti otáček při různých dávkách pouze domílaného cementu.

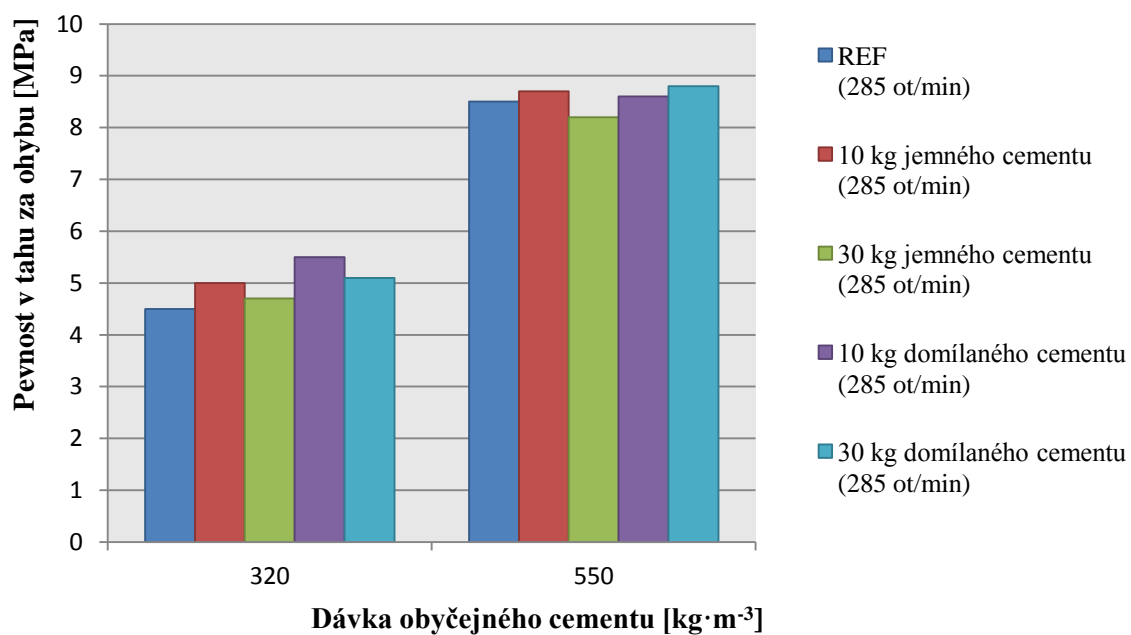
Vzorek	Pevnosti po 7 dnech [Mpa]		Pevnosti po 28 dnech [Mpa]	
	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku
320_REF_N	3,4	11,3	4,5	18,5
320_REF_R	3,7	13,0	4,7	18,3
320_10_J_N	2,8	10,7	5,0	18,4
320_30_J_N	3,0	10,9	4,7	18,1
320_10_D_N	3,8	13,1	5,5	18,6
320_30_D_N	3,9	13,3	5,1	19,8
320_10_D_R	3,5	13,0	5,8	17,8
320_30_D_R	3,6	12,9	5,0	22,2
550_REF_N	6,1	31,0	8,5	45,1
550_REF_R	6,3	29,9	7,9	43,6
550_10_J_N	6,1	30,0	8,7	45,2
550_30_J_N	5,7	30,9	8,2	44,9
550_10_D_N	6,5	28,8	8,6	44,4
550_30_D_N	7,6	30,7	8,8	44,6
550_10_D_R	6,0	30,1	8,6	44,8
550_30_D_R	6,9	31,4	8,2	44,5

**Tabulka 17: Výsledky pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech**

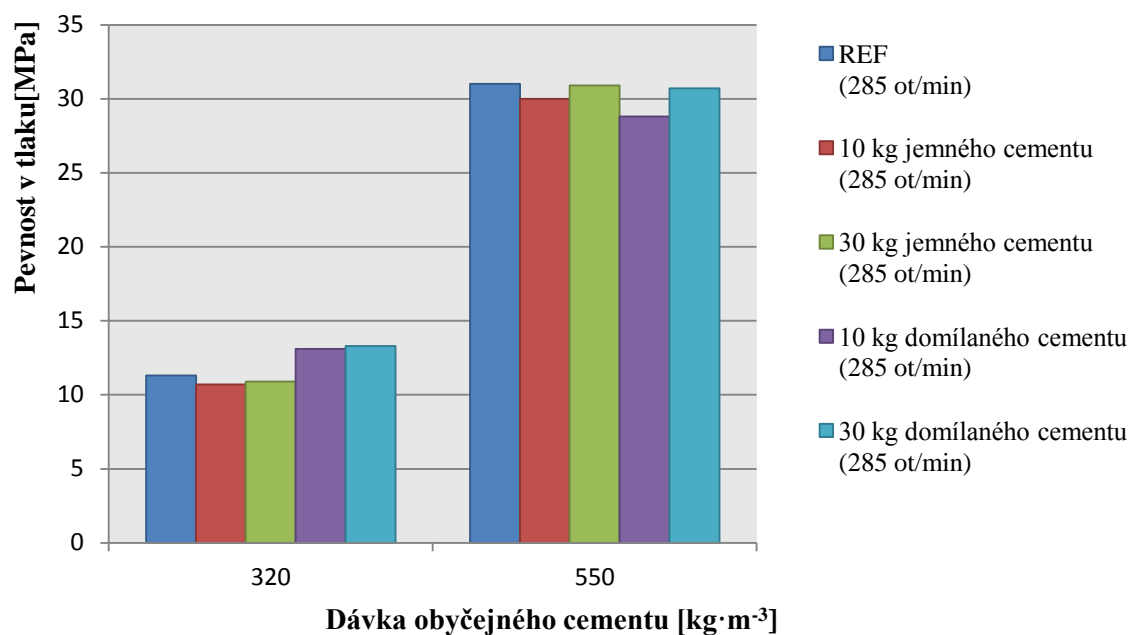




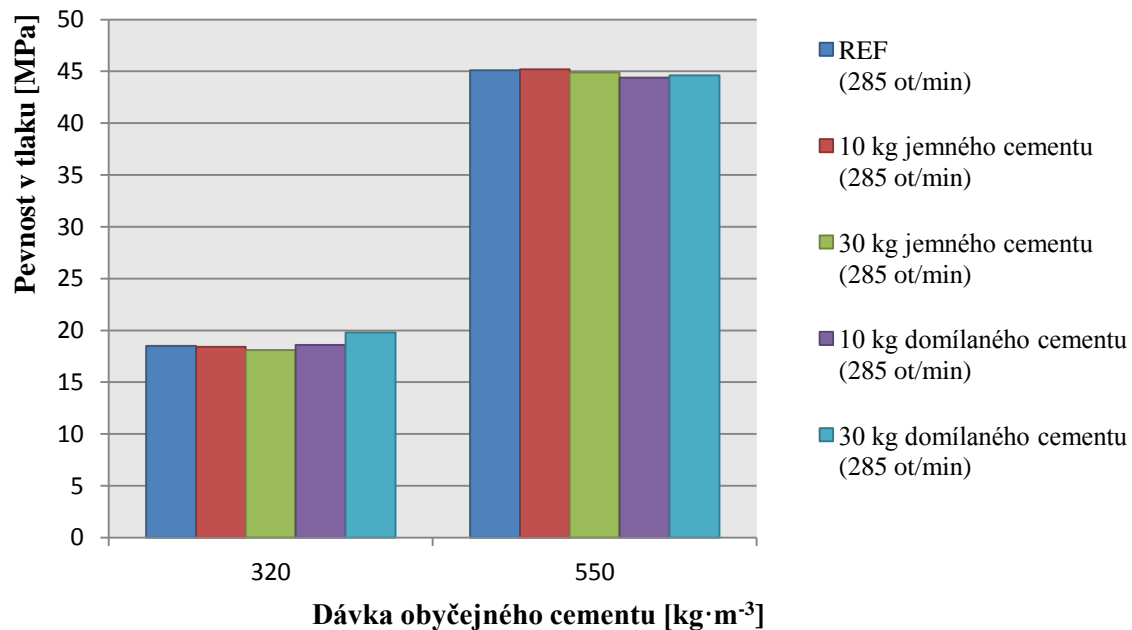
**Graf 31: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu**



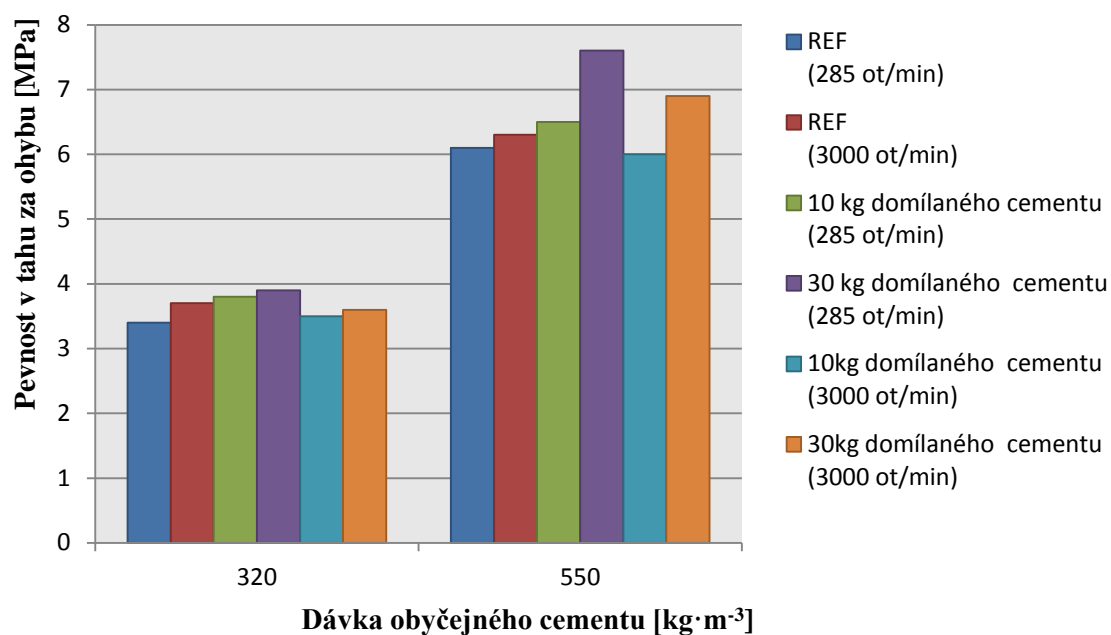
**Graf 32: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu**



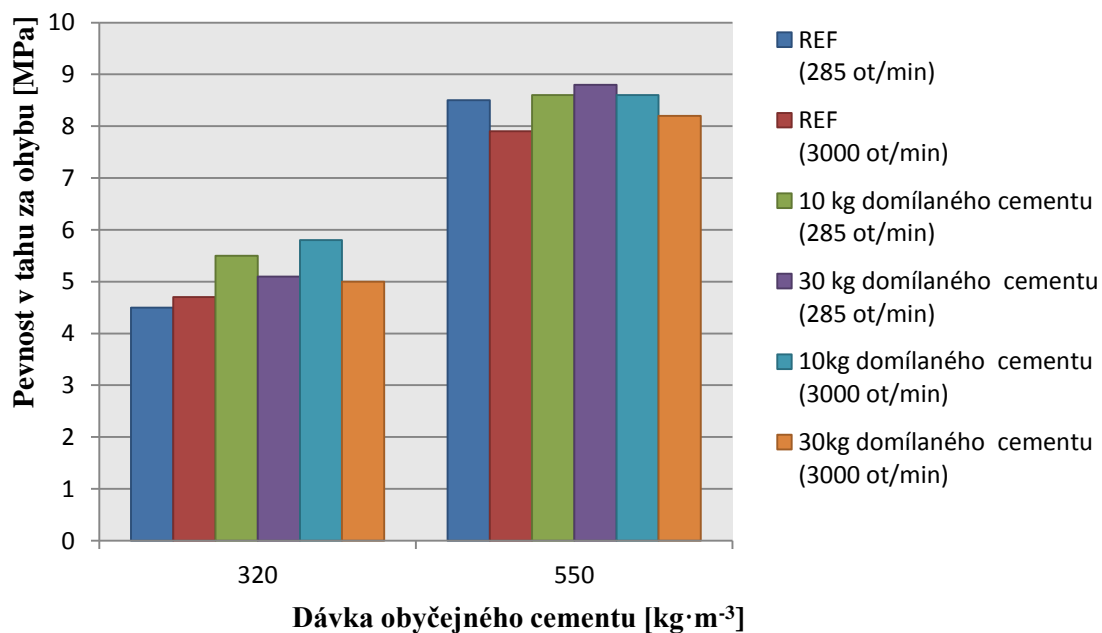
**Graf 33: Pevnosti v tlaku po 7 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu**



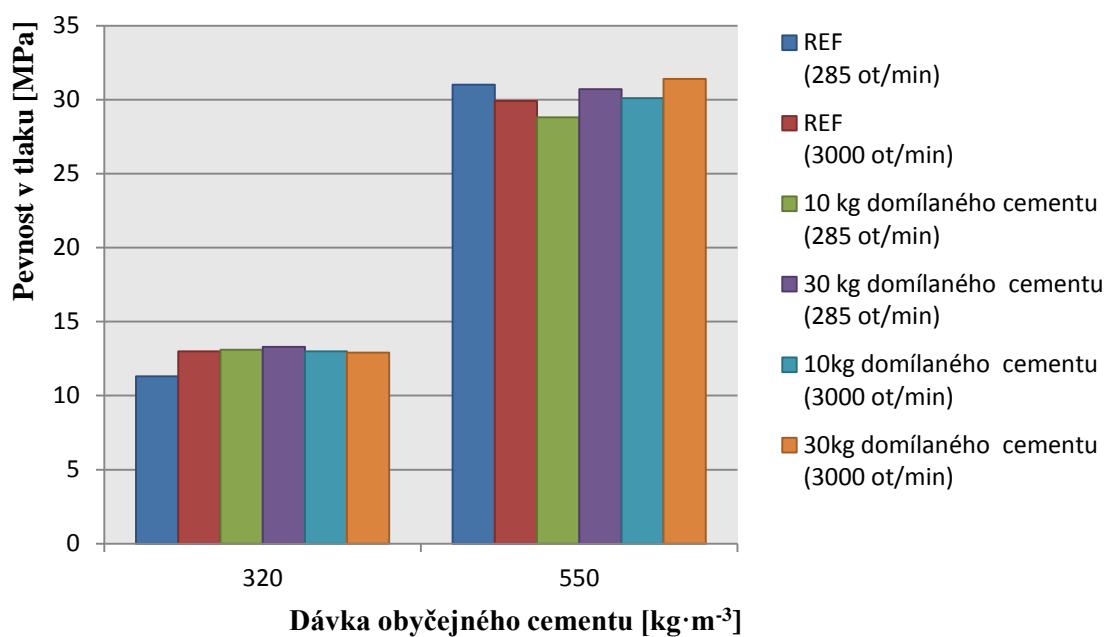
**Graf 34: Pevnosti v tlaku po 28 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu**



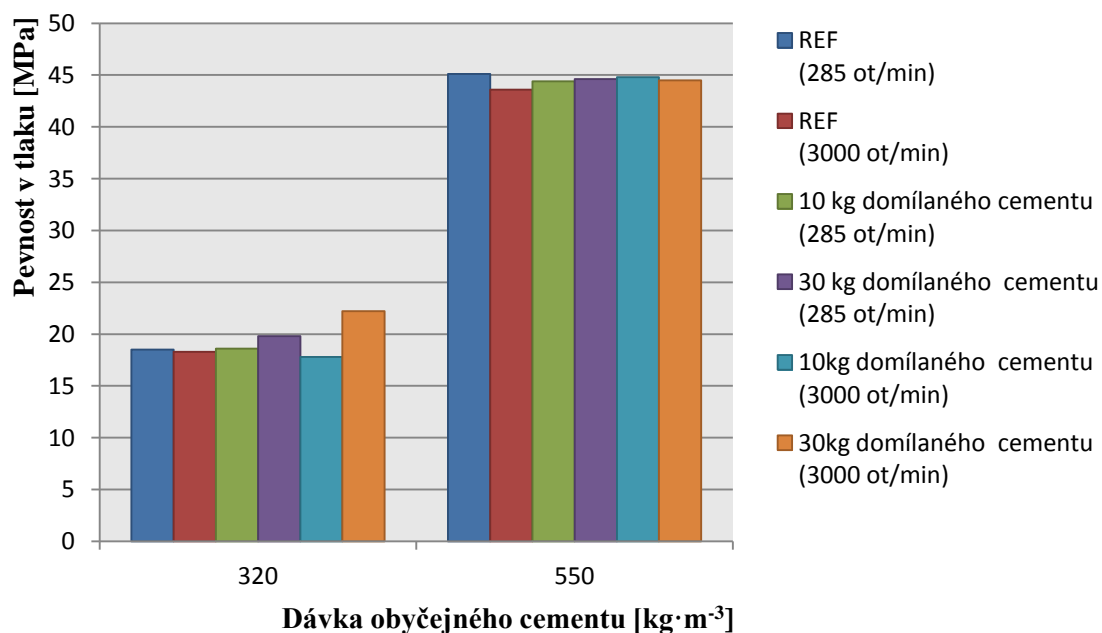
**Graf 35: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání**



**Graf 36: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání**



**Graf 37: Pevnosti v tlaku po 7 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání**



**Graf 38: Pevnosti v tlaku 28 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání**

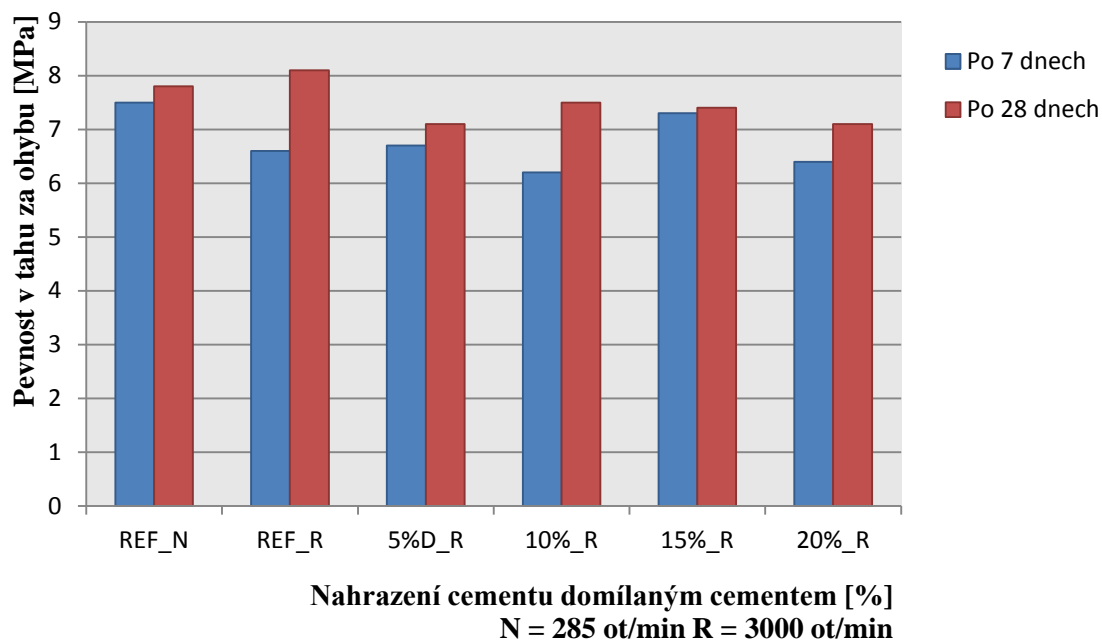
### 9.2.2 Vyhodnocení navržené metody dispergace jemnějších cementů

Navržený způsob dispergace, tedy použití účinné superplastifikační přísady a vysokorychlostního míchání se projevil jako nevyhovující. Předpokládal se mírný nárůst provzdušnění čerstvé malty, které by se mělo vlivem míchání s kamenivem a následným hutnění eliminovat. Objemové hmotnosti zatvrdlých (viz tabulka 13) vzorků tuto teorii vyvrací.

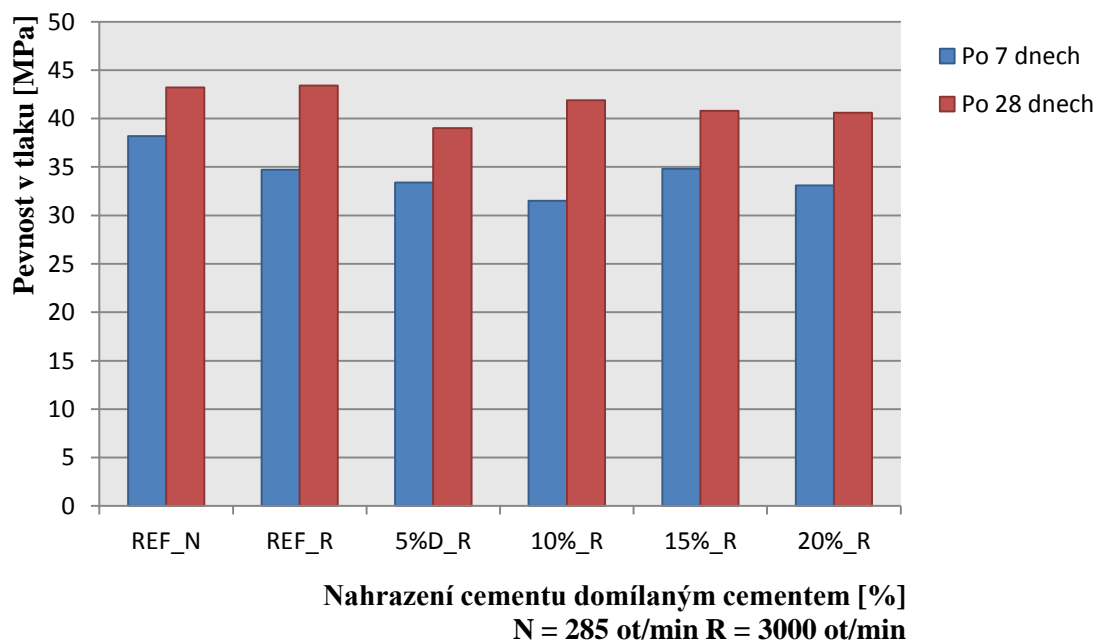
Vzorek	Pevnosti po 7 dnech		Pevnosti po 28 dnech		Obj. hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]
	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku	
450_REF_N	7,5	38,2	7,8	43,2	2120
450_REF_R	6,6	34,7	8,14	42,4	2030
450_05%D_R	6,7	33,4	7,1	39,0	2040
450_10%D_R	6,2	31,5	7,5	41,9	2050
450_15%D_R	7,3	34,8	7,4	40,8	2040
450_20%D_R	6,4	33,1	7,1	40,6	2020

**Tabulka 18: Výsledky pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech**

Při měření pevností se přesně nedal stanovit určitý trend poklesu nebo vzrůstu pevností vlivem přidaného domílaného cementu. Pevnosti vzorků míchané vysokou rychlostí měly oproti referenčním, normově míchaným vzorkům, nižší pevnosti vlivem již zmíněného provzdušnění. Naměřené rozdíly v pevnostech vzorků míchaných vysokými otáčkami jsou zanedbatelné.



**Graf 39: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech – porovnání vlivu nahrazení cementu domílaným cementem**

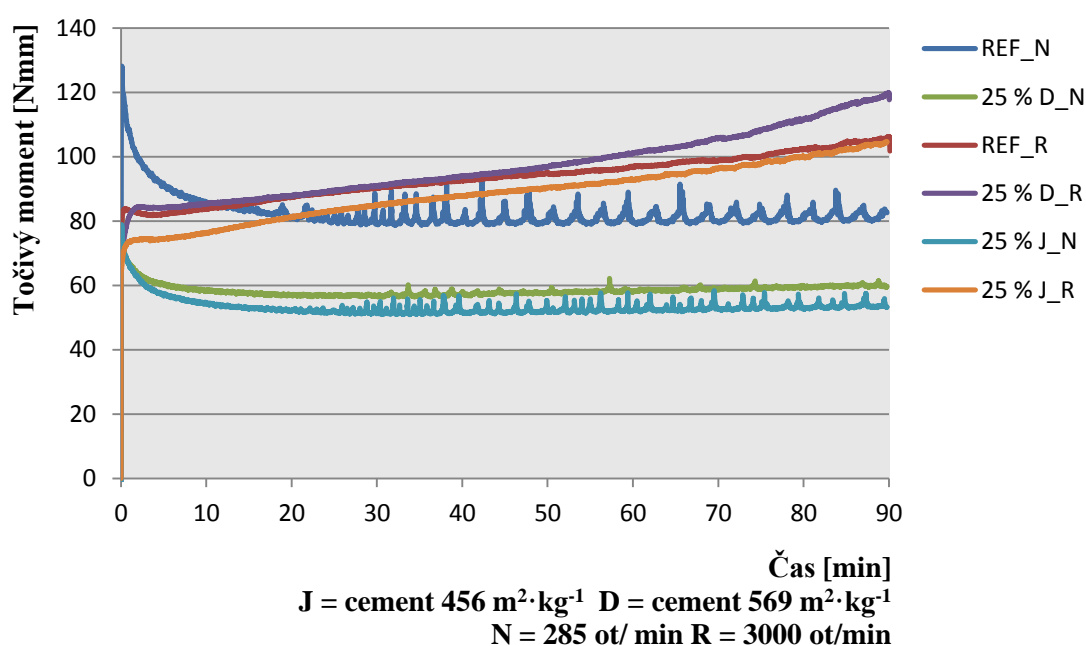


**Graf 40: Pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech – porovnání vlivu nahrazení cementu domílaným cementem**

### 9.3 Měření viskozity

Při sledování reologie cementových past v průběhu 90 minut byly zaznamenány rozdíly nejen vlivem přidání jemnějších cementů, ale hlavně vlivem rychlosti otáček. Tento faktor se projevoval hlavně prudkým stoupáním sledované křivky, oproti téměř konstantnímu průběhu u vzorků míchané normalizovanými otáčkami. Právě na základě těchto výsledků byla navržena zkouška sledování vývinu hydratačního tepla za 72 hodin.

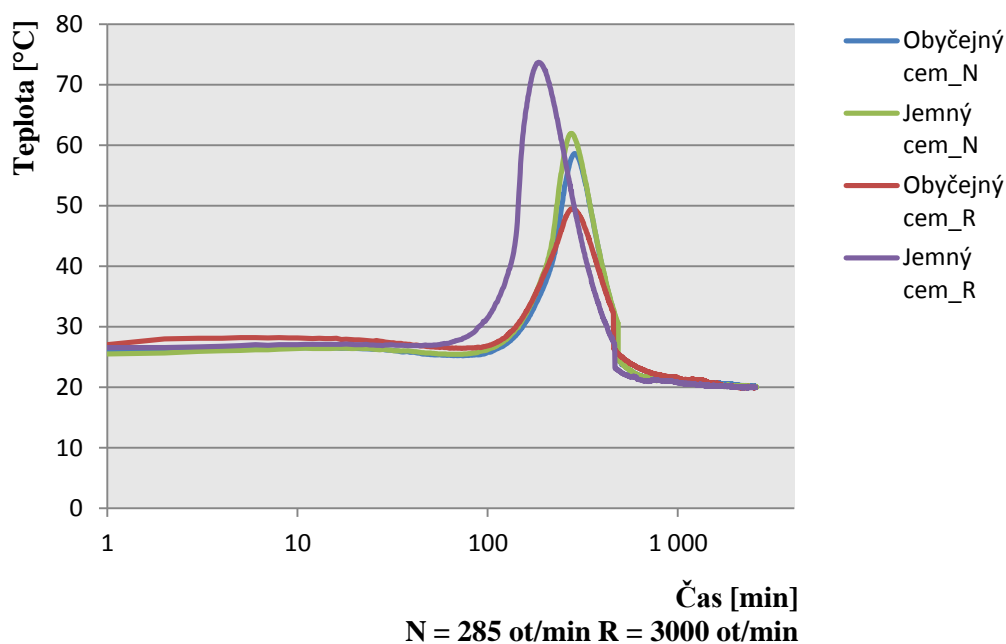
Nahrazením obyčejného cementu z 25 % cementem jemným a domílaným se viskozita pasty paradoxně snížila. Při vyšších otáčkách míchání byla však vyšší oproti referenčním vzorkům, míchaným jak pomalými, tak rychlými otáčkami.



**Graf 41: Vliv přidání domílaného cementu a rychlosti otáček na viskozitě cementové pasty v čase 90 minut**

### 9.4 Měření vývinu hydratačního tepla

Vliv vysokorychlostního míchání se projevil i na vývinu hydratačního tepla, které mělo v případě jemného cementu vyšší hodnotu a rychlejší náběh oproti referenčnímu vzorku. U obyčejného cementu byla naměřena nižší hodnota. Při pohledu na výsledek viskozity by se dal však předpokládat podobný průběh jako u jemného cementu míchaného vysokorychlostně. Možná je taky chyba při provádění zkoušky (viz diskuze).



**Graf 42: Vývin hydratačního tepla obyčejného a jemného cementu v čase**

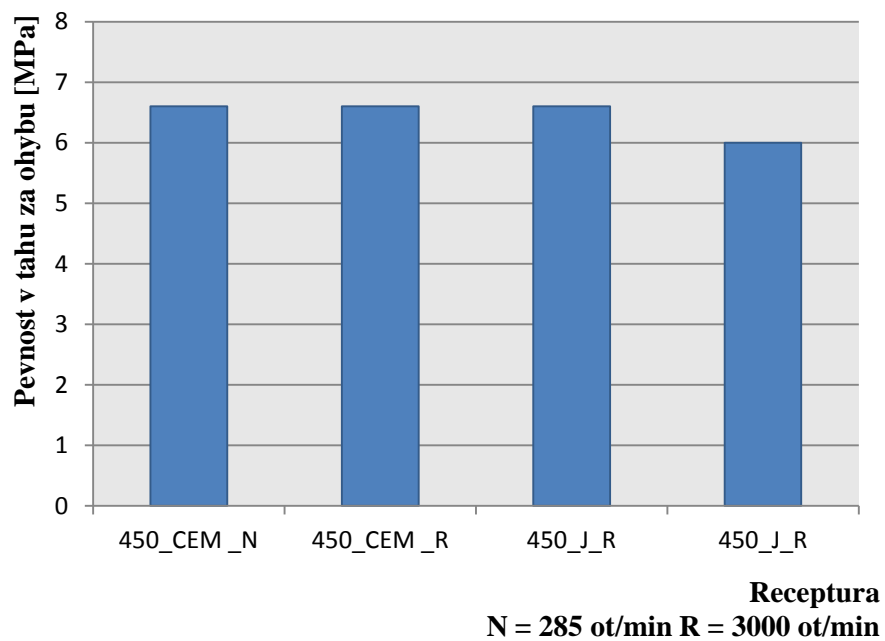
## 9.5 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 3 dnech

Počáteční pevnosti normalizovaných malt po 3 dnech vlivem rychlosti otáček mírně klesly, což bylo v rozporu s očekáváním na základě zkoušek viskozity a hydratačního tepla. Jednou z možných příčin je vnášením různých chyb při míchání rychlými otáčkami. Ty jsou okomentovány v jedné z částí diskuze.

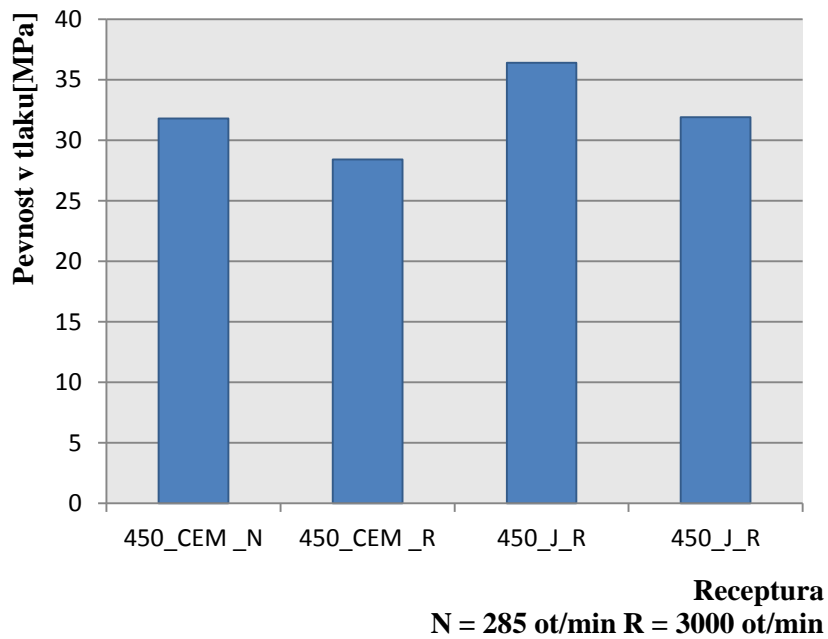
Vzorek	Pevnosti po 3 dnech	
	V tahu za ohybu	V tlaku
450_CEM_N	6,6	31,8
450_CEM_R	6,6	28,4
450_J_N	6,6	36,4
450_J_R	6,0	31,9

**Tabulka 19: Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 3 dnech**





**Graf 43: Pevnosti v tahu za ohybu po 3 dnech – vliv rychlosti míchání**



**Graf 44: Pevnosti v tlaku po 3 dnech – vliv rychlosti míchání**

## 10 Diskuze výsledků

Při přidávání jemného cementu k obyčejnému portlandskému cementu lze očekávat až výrazné změny v mikrostruktuře, které vedou k lepším fyzikálně mechanickým vlastnostem. Hlavními faktory, které jsou součástí problematiky mikrostruktury je porosita a tvorba hydratačních produktů. Mícháním obyčejného a velmi jemného cementu dojde k výraznému poklesu výskytu pórů a zvýšenou tvorbou únosného C-S-H gelu. Všichni autoři zkoušející vliv přidávání jemných nebo ultra jemných cementů do cementových kompozitů vždy získali vyšší pevnosti oproti referenčním vzorkům. Jemné cementy mají v sobě uloženo velké množství energie vlivem intenzivního mletí. Tento fakt by se měl projevit hlavně v pevnostech po 7 dnech.<sup>[62]</sup> Množství nahrazeného obyčejného cementu bylo vždy omezeno, protože při vyšších dávkách již pevnosti klesaly. Například nejvhodnější zastoupení v experimentu [62] bylo 35 % jemného cementu ( $900 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) a 65 % obyčejného cementu, kdy byly naměřeny nejvyšší pevnosti v tlaku.

Jako důvod může být vliv křivky zrnitosti smíchaného cementu, který by měl být co nejkompaktnější, tím pádem je poměr jemnějšího a obyčejného cementu důležitý.

Z naměřených výsledků praktické části je znát pouze nepatrný vliv přidání použitých cementů k vyrobeným maltám. Řešení dané problematiky by bylo nejspíše vhodné řešit s mnohem jemnějším cementem (případně ultra jemným cementem nebo nanocementem), než který byl pro zkoušky dodán.

Zajímavé výsledky však byly získány aplikací vysokorychlostního míchání. Jeho vliv se projevoval při každé zkoušce, nejvíce pak při měření konzistence a vývoji hydratačního tepla.

### **Vliv přidání jemného a domílaného cementu na pevnosti v tlaku a tahu za ohybu:**

Co se týče vlivu přidávaných cementů na pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku, nebyly zjištěny výrazné změny oproti referenčním vzorkům.

U malty, obsahující  $320 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  obyčejného cementu, byly naměřeny pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech (v porovnání s referenční maltou, obsahující pouze obyčejný portlandský cement) nižší po přidání jemného cementu, ale srovnatelné s přídatkem cementu domílaného. Po 28 dnech byly po přidání obou cementů naměřeny vyšší pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší pak u dávky  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  domílaného cementu.

Malty s recepturou obsahující  $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  obyčejného cementu vykazovaly téměř totožné hodnoty pevností v tahu za ohybu jak po 7 tak po 28 dnech zrání. Pouze u dávky  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  domílaného cementu byla po 7 dnech naměřena pevnost v tahu za ohybu o 1,5 MPa (cca 25 %) vyšší, oproti referenčnímu vzorku.

Pevnost v tlaku byla naprosto srovnatelná jak po 7, tak po 28 dnech zrání u obou druhů malt. Pouze malty s  $320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  obyčejného cementu a přídavkem  $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  domílaného cementu vykazovaly mírný nárůst pevností po 7 dnech oproti ostatním vzorkům.

Při pohledu na granulometrii zkoušených cementů lze vyskytující se pokles pevností vysvětlit vyšším zastoupením zrn větší frakce. V případě, že navíc dojde ke shlukování zrn těch nejmenších, má přidání jemnějšího cementu spíše negativní dopad.

Jako možné řešení zlepšení výsledků bylo rozmíchání cementu ve vodě vysokorychlostním mícháním, které by navíc teoreticky mohlo upravit výslednou křivku granulometrie dalším rozbíjením zrn vlivem odstředivé síly, třením apod.

#### **Vliv rychlosti otáček míchání na pevnosti malt bez/s domílaným cementem:**

Naměřené pevnosti byly opět srovnatelné, ať už co se týče porovnání dávek přidaného domílaného cementu, nebo porovnání rychlosti otáček. Potenciál vysokorychlostního míchání se jevil v počátečních pevnostech, což dokazovaly výsledky měření viskozity v čase 90 minut a hydratačního tepla v průběhu 72 hodin. Výsledky jsou popsány v dalším bodě diskuze.

Při celkovém pohledu na výsledky pevností v tahu za ohybu a v tlaku se nedá prohlásit, že použitý jemně mletý cement má výrazný vliv na vlastnosti zatvrdlé malty. Ani po jeho domílání z  $456 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$  na  $569 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$  nedošlo k výraznému nárůstu pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech. Jak bylo zmíněno na začátku diskuze, výsledná modifikace mikrostruktury vychází z celkové granulometrie cementu. Výsledky granulometrie zkoušených cementů můžou vyskytující se pokles pevností vysvětlit vyšším zastoupením zrn větší frakce. V případě, že navíc dojde ke shlukování zrn těch nejmenších, má přidání jemnějšího cementu spíše negativní dopad na celkovou granulometrii smíchaných cementů.

Bylo by vhodné provést stejné zkoušky, ale s použitím ultra jemného cementu (případně nanocementu), nebo zkoušky provést na normových (případně s variací více vodních

součinitelů) maltách, kdy by byla náhrada normálního cementu jemným cementem z 0 – 100 %. Na základě optimálního poměru míchaných cementů by se dalo odhadnout požadované množství pro určitou dávku cementu, jak bylo například v případě tohoto experimentu 320 a 550 kg·m<sup>-3</sup> pro získání vyšších pevností.

### **Vliv kombinace vysokorychlostního míchání a použití plastifikátoru na pevnosti:**

Jak již bylo řečeno, navržený způsob dispergace jemných cementů nebyl vhodný z důvodu nadměrného provzdušnění čerstvé malty, která i po zatvrdnutí vykazovala přítomnost většího množství vzduchu, projevující se na snížené objemové hmotnosti (průměrný pokles o 84 kg·m<sup>-3</sup>). Provzdušnění bylo možná způsobeno zvolením nevhodné plastifikační přísady, která není určena pro vysokorychlostní míchání a suspenzi takto napěňuje. V případě opakování experimentu by bylo vhodné použít plastifikační přísadu na bázi naftalenů, která by teoreticky neměla tento jev způsobovat. Jako dalším možným zásahem, eliminující jev napěnění, by bylo možno namíchanou cementovou pastu nechat “odležet” na několik minut, před samotným mícháním v normalizované míchačce. Kombinace plastifikační přísady, odpěňovací přísady a vysokorychlostního míchání se také neosvědčila. Došlo ještě k výraznějšímu napěnění, než bez aplikace odpěňovací přísady.

Dalo by se předpokládat, že po aplikování jedné z vhodnějších metod získáme určitý nárůst pevností, protože při pohledu na graf znázorňující ať už pevnosti v tahu za ohybu nebo v tlaku je zřejmé, že pevnosti obou referenčních vzorků (míchaných normově a vysokorychlostně) jsou srovnatelné. V případě, že by tedy referenční vzorek míchaný vysokorychlostně neobsahoval takové množství vzduchu, získal by vyšší pevnosti.

Avšak pevnosti vzorků, u kterých docházelo k nahrazení obyčejného cementu domílaným cementem, byly vždy nižší, oproti referenčnímu.

### **Vliv přidávání jemného/domílaného cementu a rychlosti otáček na viskozitu cementového tmele:**

V případě vzorků míchaných normalizovanou míchačkou lze na průběhu viskozity v čase 90 minut vidět počáteční pokles viskozity až do ustálené hodnoty, která se až do konce měření téměř nemění. Pokles je způsoben počáteční hydratací cementu a následným rozmícháním viskozimetrem a tím snížení viskozity tmele. Nejmenší viskozita byla naměřena u receptury s 25 % dodaného jemně mletého cementu, což nejspíše prokazuje jeho nevhodnost rozložení zrn. Jemnější cement, vhodný pro míchání s obyčejným pro

získání vyšších pevností, by měl cementovou pastu spíše zahušťovat vlivem vyššího měrného povrchu a tím větší potřebě záměsové vody na obalení zrn. Receptura s domílaným cementem měla jen nepatrně vyšší viskozitu, stále však nižší než vzorek obsahující pouze obyčejný cement.

Vlivem vysokorychlostního míchání nedocházelo k poklesu viskozity na počátku měření. Naopak viskozita relativně prudce vzrůstala po celých 90 minut. Hodnotu viskozity na konci měření měly všechny receptury téměř stejnou. Tento výsledek nejspíš dokazuje vybuzení hydratace vlivem rychlých otáček, které zmenší zrna cementu a dodá jim energii.

### **Měření hydratačního tepla obyčejného a domílaného cementu a vlivu rychlosti otáček:**

Při rozmíchání cementu ve vodě za normální rychlosti otáček měl větší hodnotu hydratačního tepla vzorek jemného cementu. Jejich časový vývin byl totožný u obou měřených vzorků. K výraznějším změnám došlo po rozmíchání cementů pomocí vysokých otáček. Jemný cement zvýšil maximální hodnotu hydratačního tepla o 11,8°C a svého maxima dosáhl o 2,9 hodin dříve. U obyčejného cementu byl zaznamenán pokles hydratačního tepla a sice o 9,1°C a dosažení maxima se lišilo jen o několik minut.

Nejspíše by bylo vhodné provést zkoušku opakovaně s větší dávkou míchaného cementu (ale stejným vodním součinitelem) ve vysokorychlostní míchačce, protože při provádění zkoušky byly vzorky míchány v malém množství a docházelo k nalepování tmele na stěnu míchačky. Tak se mohla do výsledku vnášet chyba.

### **Měření pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 3 dnech – vliv vysokorychlostního míchání**

Vlivem vysokorychlostního míchání docházelo k poklesu pevnosti v tlaku po 3 dnech zrání malty jak s obyčejným, tak s jemně mletým cementem. Původně se předpokládaly hodnoty vyšší (na základě výsledků měření viskozity a hydratačního tepla), oproti vzorkům míchaným normalizovaným způsobem.

Pro určení potenciálního důvodu poklesu pevností by bylo třeba provést další zkoušky, jako například porovnání mikrostruktur jednotlivých vzorků nebo porovnání velikosti zrn po rozmíchání (například mikroskopicky, po předchozím umrtvení hydratace).

Jako jedna z příčin by mohla být tvořící usazenina menší dávky cementu na dně míchačky v průběhu míchání, která se tvoří v místě uložení hřídele. Pro omezení by byl nutný zásah

do konstrukce míchačky. Při vyšším vodním součiniteli (například jako u receptur v první části experimentu) se usazenina tvořila jen nepatrně.

## 11 Závěr

Bakalářská práce se zabývala vysokopevnostními betony, hlavně tedy jejich vlastnostmi po aplikaci příměsí. V teoretické části byly popisovány vlivy na reologii, tuhnutí a tvrdnutí, pevnosti a další vlastnosti betonů, které byly sledovány také v praktické části, kde byl zkoumán vliv přidávání jemného cementu k maltám o zadaném složení. Celkově by se dalo říci, že dodaný jemný cement v použitých dávkách 10 a 30 kg·m<sup>-3</sup> neměl žádný vliv na vlastnosti malty s množstvím cementu 320 a 550 kg·m<sup>-3</sup>. Proto bylo navrženo jeho domílání, kdy se měrný povrch zvýšil z původních 456 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup> na 569 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>. Opět byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku na stejných recepturách s použitím domílaného cementu, ale výsledky byly opět srovnatelné s referenčními vzorky. Dalším navrženým řešením, jak získat pomocí dostupných jemnějších cementů vyšší pevnosti cementových malt, bylo použití vysokorychlostního míchání. Tím se sledovalo další zmenšení zrn cementu a také lepší dispergace zrn nejjemnějších. Ukázalo se však, že vysokorychlostní míchání je v tomto případě neúčinné a byly získány opět podobné výsledky.

V průběhu provádění experimentu byl zaznamenán vliv vysokorychlostního míchání na konzistenci vyrobených malt, která se po použití (u některých receptur) výrazně měnila. Bylo proto provedeno několik dalších zkoušek, které byly zaměřeny hlavně na sledování vlivu rychlosti otáček míchání. Byl stanoven vliv na viskozitu cementového tmele, kde byly zaznamenány velké rozdíly oproti vzorkům míchaným v normalizované míchačce. Stejně zajímavé byly výsledky vývinu hydratačního tepla v průběhu času 72 hodin, které se opět měnily v závislosti na rychlosti otáček.

Ačkoliv nebyly dosaženy vyšší pevnosti vyrobených cementových malt, bylo vypořazováno hned několik vlivů vysokorychlostního míchání, které by postupně mohli nasměrovat k původnímu cíli růstu pevností.

Dodaný jemně mletý cement se projevil jako nevhodný ke vstupování do receptury za účelem zvýšit pevnosti.

## 12 Seznam použitých zdrojů

- [1] AÍTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [2] MEHTA, P a Paulo J MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 3rd ed. /. New York: McGraw-Hill, c2006, xxi, 659 p. ISBN 071462899.
- [3] The Science Of Concrete [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3\\_5.html](http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_5.html)
- [4] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. Stavební materiály. Brno: CERM, 1997, 205 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [5] TAYLOR, H. Cement chemistry. 2nd ed. London: T. Telford, 1997, xviii, 459 p. ISBN 0727725920
- [6] TIŠLOVÁ, Renata. Hydration of natural cements. V Tribunu EU vyd. 1. Brno: Tribun EU, 2009, 169 s. ISBN 978-80-7399-647-5.
- [7] BETON – VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI [online]. Praha [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/beton.pdf>. Přednáška.
- [8] KURTIS, Dr. Kimberly. Portland Cement Hydration [online]. Atlanta, Georgia [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://people.ce.gatech.edu/~kk92/hyd07.pdf>. Přednáška.
- [9] Understanding cement: Cement hydration. Understanding cement [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.understanding-cement.com/hydration.html>
- [10] VYSOKOHODNOTNÉ BETONY PRO MOSTY PK. [online]. 2010 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20226.pdf>
- [11] HELA, Rudolf. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 110 s.
- [12] WU, Ke-Ru, Bing CHEN, Wu YAO a Dong ZHANG. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. Cement and Concrete Research [online]. 2001, vol. 31, issue 10, s. 1421-1425 [cit. 2015-05-23]. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00588-9. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601005889>
- [13] BÍLÝ, Petr. Vysokohodnotný beton: úvod, složení [online]. In: . Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1/vyuka/YVHB/YVHB\\_01.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1/vyuka/YVHB/YVHB_01.pdf)
- [14] SEKHAR, Seshadri, P.N. RAGHUNATH a . Influence of Water Binder Ratio on High Performance Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal* [online]. 2014, (8): 18-21 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://benthamopen.com/contents/pdf/TOBCTJ/TOBCTJ-8-18.pdf>
- [15] SAVANA., P. SARIKA, RAO, SEKHAR a G. APPARAO. Studies on Relationship Between Water/Binder Ratio And Compressive Strength Of High Volume Fly Ash Concrete. *American Journal of Engineering Research* [online]. 2013, (8) [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.ajer.org/papers/v2%288%29/M028115122.pdf>



- [16] TERZIJSKI, Ivailo. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách české republiky – část II. vlastnosti vysokopevnostního betonu a jejich zkoušení. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, (4): 44-54.
- [17] TERZIJSKI, Ivailo. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách české republiky – část I. úvod a složky vysokopevnostního betonu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, (1): 54-64.
- [18] ČSN EN 206-1 BETON – ČÁST 1:: SPECIFIKACE, VLASTNOSTI, VÝROBA A SHODA. 2013. Praha.
- [19] VISO, J.R. del, J.R. CARMONA a G. RUIZ. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2008, vol. 38, issue 3, s. 386-395 [cit. 2015-05-23]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.020. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607002293>
- [20] TKACZEWSKA, E. Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, vol. 70, s. 388-393 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.096. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814008587>
- [21] The Correlation between Aggregate Shape and Compressive Strength of Concrete: Digital Image Processing Approach. *International journal of structural and civil engineering research* [online]. 2013, (3). ISSN 2319 – 6009. Dostupné z: [http://www.academia.edu/3726764/The\\_Correlation\\_between\\_Aggregate\\_Shape\\_and\\_Compressive\\_Strength\\_of\\_Concrete\\_Digital\\_Image\\_Processing\\_Approach](http://www.academia.edu/3726764/The_Correlation_between_Aggregate_Shape_and_Compressive_Strength_of_Concrete_Digital_Image_Processing_Approach)
- [22] KMECOVÁ, Veronika. Nový superplastifikátor pre vysokohodnotné betony. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, (6): s. 33-36.
- [23] MELICHAR, Tomáš a David PROCHÁZKA. Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, (6): 66-73.
- [24] ŠTĚRBA, Alain. Příměsí dříve a nyní: Část I. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, (6): 20-27.
- [25] Fly Ash Australia: What is fly ash [online]. Dostupné z: <http://www.flyashaustralia.com.au/whatisflyash.aspx>
- [26] DROCHYTKA, Rostislav. Lehké stavební látky. 1. vyd. Brno: VUT, 1993, 124 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0514-7.
- [27] ALSADEY, Salahaldeen. Influence of Fly Ash Cement Replacement on Workability and Strength of Concrete. *Lybia*. Dostupné také z: <http://www.scie.org.au/issue/jmpl/vol1/no2/Influence%20of%20Fly%20Ash%20Cement%20Replacement%20on%20Workability%20and%20Strength%20of%20Concrete.pdf>
- [28] POON, C.S., L. LAM a Y.L. WONG. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research* [online].

- 2000, vol. 30, issue 3, s. 447-455 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00271-9. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/223423664\\_A\\_study\\_on\\_high\\_strength\\_concrete\\_prepared\\_with\\_large\\_volumes\\_of\\_low\\_calcium\\_fly\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/223423664_A_study_on_high_strength_concrete_prepared_with_large_volumes_of_low_calcium_fly_ash)
- [29] FRIDRICHOVÁ, Marcela. Možnosti výroby směsných cementů na bázi popílku. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. 2013, (4).
- [30] THOMAS, Michael. Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. Cement.org. Dostupné také z: [http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/durability/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-in-concrete.pdf?sfvrsn=4](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-in-concrete.pdf?sfvrsn=4)
- [31] TECHNOART STAFF. Foto Fly Ash Secara Mikroskopis. Technoart Staff [online]. Dostupné z: <http://artikel-teknologi.com/polutan-polutan-hasil-pembakaran-batubara-pada-boiler/>
- [32] VAITKEVIČIUS,. Influence of Silica Fume on Ultrahigh Performance Concrete. World Academy of Science [online]. 2014. Dostupné z: <http://waset.org/publications/9997039/influence-of-silica-fume-on-ultrahigh-performance-concrete>
- [33] DUVAL, R a E.H KADRI. Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes. Cement and Concrete Research [online]. 1998, vol. 28, issue 4, s. 533-547 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/s0008-8846(98)00010-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698000106>
- [34] LI, Gengying a Xiaozhong WU. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. Cement and Concrete Research [online]. 2005, vol. 35, issue 6, s. 1128-1134 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.08.014. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604003874>
- [35] BILJANA, Ilic, Mitrovic ALEKSANDRA a Milicic LJILJANA. Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijska industrija* [online]. 2010, 64(4): 351-356. DOI: 10.2298/HEMIND100322014I. ISSN 0367-598x. Dostupné z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0367-598X1000014I>
- [36] Characteristics of Metakaolin and its use in concrete. Ecosart concrete [online]. Dostupné z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/prfournier.pdf>
- [37] SIDDIQUE, Rafat a Juvas KLAUS. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science* [online]. 2009, vol. 43, 3-4, s. 392-400 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.clay.2008.11.007. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131708002706>
- [38] KADRI, Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar. *Applied Clay Science* [online]. 2011, vol. 53, issue 4, s. 704-708 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.clay.2011.06.008. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131711002171>

- [39] PAIVA, H., A. VELOSA, P. CACHIM a V.M. FERREIRA. Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2012, vol. 42, issue 4, s. 607-612 DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.01.005. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884612000063>
- [40] MIYAZAWA, Shingo, Takashi YOKOMURO, Etsuo SAKAI, Atsushi YATAGAI, Nobukazu NITO a Kiyoshi KOIBUCHI. Properties of concrete using high C3S cement with ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, vol. 61, s. 90-96. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.008. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002554>
- [41] KOLANI, B., L. BUFFO-LACARRIÈRE, A. SELLIER, G. ESCADEILLAS, L. BOUTILLON a L. LINGER. Hydration of slag-blended cements. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2012, vol. 34, issue 9, s. 1009-1018. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.05.007. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512001175>
- [42] RAMEZANIANPOUR, Ali A., E. GHIASVAND, I. NICKSERESHT, M. MAHDIKHANI a F. MOODI. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2009, vol. 31, issue 10, s. 715-720. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001383>
- [43] PALANIANDY, Samayamutthirian, Nurdina Abd KADIR a Mariatti JAAFAR. Value adding limestone to filler grade through an ultra-fine grinding process in jet mill for use in plastic industries. *Minerals Engineering* [online]. 2009, vol. 22, 7-8, s. 695-703 DOI: 10.1016/j.mineng.2009.02.010. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687509000661>
- [44] TĚLNÍK, Vladimír a Radovan NEČAS. Uplatnění vápencové suroviny z hlediska kvality v různých průmyslových odvětvích. Svaz výrobců cementu [online]. Dostupné z: <http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/seminar-2011/22-uplatneni-vapencove-suroviny-z-hlediska-kvality-v-ruznych-prumyslovych-odvetvych.pdf>
- [45] QUERCIA, G. a H.J.H. BROWNSERS. Application of nano-silica in concrete mixtures [online]. 2010. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/profile/George\\_Quercia\\_Bianchi/publication/257029738\\_Application\\_of\\_nano-silica\\_%28nS%29\\_in\\_concrete\\_mixtures/links/00b7d5243e5e804358000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/George_Quercia_Bianchi/publication/257029738_Application_of_nano-silica_%28nS%29_in_concrete_mixtures/links/00b7d5243e5e804358000000.pdf)
- [46] GHAFARI, Ehsan, Hugo COSTA, Eduardo JÚLIO, António PORTUGAL a Luisa DURÃES. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials & Design* [online]. 2014, vol. 59, s. 1-9 DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.051. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914001691>
- [47] SHAIKH, F.U.A., S.W.M. SUPIT a P.K. SARKER. A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes.

- Materials & Design [online]. 2014, vol. 60, s. 433-442 . DOI: 10.1016/j.matdes.2014.04.025. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914002933>
- [48] JO, Byung Wan, Sumit CHAKRABORTY a Ki Heon KIM. Investigation on the effectiveness of chemically synthesized nano cement in controlling the physical and mechanical performances of concrete. Construction and Building Materials [online]. 2014, vol. 70, s. 1-8 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.090. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814008526>
- [49] PARADISE, Melissa a Tarun GOSWAMI. Carbon nanotubes – Production and industrial applications. Materials & Design [online]. 2007, vol. 28, issue 5, s. 1477-1489 DOI: 10.1016/j.matdes.2006.03.008. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306906000914>
- [50] POPOV, V. Carbon nanotubes: properties and application. Materials Science and Engineering: R: Reports [online]. 2004, vol. 43, issue 3, s. 61-102 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.mser.2003.10.001. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X03001268>
- [51] KONSTA-GDOUTOS, Maria S., Zoi S. METAXA a Surendra P. SHAH. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research [online]. 2010, vol. 40, issue 7, s. 1052-1059 DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610000542>
- [52] NanoFormula: Nano Aluminium Oxide [online]. Dostupné z: [http://www.nanoformula.eu/asp/n\\_aluminiumoxide.aspx](http://www.nanoformula.eu/asp/n_aluminiumoxide.aspx)
- [53] NAZARI, Ali. Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete. The journal of American science [online]. East Lansing, Mich.: Marsland Co, 2010, 6(5)
- [54] BEHFARNIA, Kiachehr a Niloofar SALEMI. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. Construction and Building Materials [online]. 2013, vol. 48, s. 580-584 . DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088. Dostupné z : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813007022>
- [55] THONGSANITGARN, Pailyn, Watcharapong WONGKEO, Arnon CHAIPANICH a Chi Sun POON. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. Construction and Building Materials [online]. 2014, vol. 66, s. 410-417 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.060. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814005443>
- [56] SCHÖLER, Axel, Barbara LOTHENBACH Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites [online]. 2015, vol. 55, s. 374-382 . DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514001863>

- [57] SABDONO, Parang, Frisky SUSTIAWAN a Dion Aji FADLILLAH. The Effect of Nano-cement Content to the Compressive Strength of Mortar. *Procedia Engineering* [online]. 2014, vol. 95, s. 386-395 DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.197. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814032561>
- [58] JO, Byung Wan, Sumit CHAKRABORTY a Kwang Won YOON. Synthesis of a Cementitious Material Nanocement Using Bottom-Up Nanotechnology Concept: An Alternative Approach to Avoid CO<sub>2</sub> Emission during Production of Cement. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2014, 2014: 1-12 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1155/2014/409380. ISSN 1687-4110. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2014/409380/>
- [59] GIRI, V. Sabari, R. SARATHI, S.R. CHAKRAVARTHY a C. VENKATASESHAIAH. Studies on production and characterization of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder using wire explosion technique. *Materials Letters* [online]. 2004, vol. 58, issue 6, s. 1047-1050 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.08.015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X03006748>
- [60] KOSÍKOVÁ, Jana. Laserová difrakce pro měření velikost částic. *SUPMAT: Podpora vzdělávání pracovníků center pokročilých stavebních materiálů* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [www.supmat.cz](http://www.supmat.cz)
- [61] LANGE, F., H. MÖRTEL a V. RUDERT. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. *Cement and Concrete Research* [online]. 1997, vol. 27, issue 10, s. 1481-1488 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00189-0. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884697001890>
- [62] ARTEAGA-ARCOS, Juan Carlos, Obed Arnoldo CHIMAL-VALENCIA, Hernani Tiago YEE-MADEIRA a Sebastián Díaz de la TORRE. The usage of ultra-fine cement as an admixture to increase the compressive strength of Portland cement mortars. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, vol. 42, s. 152-160 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.017. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813000809#b0070>
- [63] GIKAS, G., N.-M. BARKOULA a A.S. PAIPETIS. Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2012, vol. 43, issue 6, s. 2697-2705 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.070. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812001199>

## 13 Seznam příloh

### 13.1 Seznam grafů

Graf 1: Vliv tvaru a velikosti na zkoušení pevnosti betonu v tlaku.....	14
Graf 2: Vliv množství $C_3S$ ve slínku na pevnosti betonu v tlaku.....	16
Graf 3: Množství jednotlivých hydrátů v závislosti na čase hydratace.....	18
Graf 4: Závislost pevnosti betonu na pevnosti kameniva při různém dávkování vody.....	20
Graf 5: Vliv tvaru zrn hrubého kameniva na sednutí kužele ČB.....	21
Graf 6: Vliv tvaru zrn hrubého kameniva na pevnost betonu v tlaku.....	21
Graf 7: Vliv poměru voda/pojivo na pevnost betonu v tlaku.....	23
Graf 8: Vliv poměru voda/pojivo na pevnost betonu s vysokým obsahem popílku a běžného betonu.....	24
Graf 9: Vliv dávky superplastifikátoru na rozlití kužele.....	26
Graf 10: Vliv dávky superplastifikátoru na pevnosti v tlaku (rozdílné w).....	27
Graf 11: Vliv velikosti částic popílku na výsledky zkoušky rozlitím.....	30
Graf 12: Vliv působení vyšší teploty při ošetřování betonu na pevnosti v tlaku.....	31
Graf 13: Vliv použití strusky na sednutí malty s různým druhem cementu.....	33
Graf 14: Vliv množství mikrosiliky na objemovou hmotnost čerstvého betonu.....	35
Graf 15: Vliv množství mikrosiliky na viskozitu a sednutí kužele.....	35
Graf 16: Vliv hodnoty voda/pojivo na sednutí kužele.....	36
Graf 17: Vliv dávky mikrosiliky na potřebné množství SP pro konstantní sednutí.....	36
Graf 18: Vliv ošetřování a množství MS na pevnosti betonu v tlaku.....	37
Graf 19: Vliv metakaolinu na vývin hydratačního tepla.....	39
Graf 20: Vliv použití disperzního činidla na velikosti zrn metakaolinu.....	39
Graf 21: Vliv použití SP na viskozitu malty s metakaolínem.....	40
Graf 22: Vliv použití SP na viskozitu a sednutí kužele.....	40
Graf 23: Výsledné pevnosti v tlaku malty s MK se SP.....	41

Graf 24: Výsledné pevnosti v tlaku malty s MK se SP.....	41
Graf 25: Vhodný poměr příměsí a jeho vliv na pevnosti betonu v tlaku.....	42
Graf 26: Vliv použití mikro a nanosiliky na spotřebu CH.....	44
Graf 27: Vliv nanocementu na průběh tuhnutí malty.....	46
Graf 28: Vliv množství nanocementu na pevnosti malt ze směsných a pucolánových cementů.....	47
Graf 29: Vliv dispergace CNT v maltě na viskozitu směsi.....	49
Graf 30: Granulometrie zkoušených cementů.....	64
Graf 31: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu.....	66
Graf 32: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu.....	66
Graf 33: Pevnosti v tlaku po 7 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu.....	67
Graf 34: Pevnosti v tlaku po 28 dnech – srovnání vlivu přidání jemného a domílaného cementu.....	67
Graf 35: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání.....	68
Graf 36: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání.....	68
Graf 37: Pevnosti v tlaku po 7 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání.....	69
Graf 38: Pevnosti v tlaku 28 dnech – srovnání vlivu přidání domílaného cementu a rychlosti otáček míchání.....	69
Graf 39: Pevnosti v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech – porovnání vlivu nahrazení cementu domílaným cementem.....	71
Graf 40: Pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech – porovnání vlivu nahrazení cementu domílaným cementem.....	71
Graf 41: Vliv přidání domílaného cementu a rychlosti otáček na viskozitě cementové pasty v čase 90 minut.....	72
Graf 42: Vývin hydratačního tepla obyčejného a jemného cementu v čase.....	73
Graf 43: Pevnosti v tahu za ohybu po 3 dnech – vliv rychlosti míchání.....	74

Graf 44: Pevnosti v tlaku po 3 dnech – vliv rychlosti míchání.....	74
--	----

## 13.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: SEM snímek C-S-H.....	17
Obrázek 2: SEM snímek CH.....	18
Obrázek 3: SEM snímek Aft.....	18
Obrázek 4: SEM snímky: Obyčejný cement, jemně mletý cement a domílaný cement.....	53
Obrázek 5: Sestava experimentální míchačky a detail míchacích lopatek.....	55
Obrázek 6: Schéma Viskozimatu NT a snímek v průběhu měření.....	56
Obrázek 7: Řez měřicí soustavou a snímek vzorků po ukončení měření.....	57
Obrázek 8: Schéma použitého kužele (mm) a snímek rozlití malty.....	58

## 13.3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Zastoupení minerálů ve zkoušených recepturách.....	16
Tabulka 2: Chemické složení cementových slínek.....	17
Tabulka 3: Zastoupení složek jednotlivých receptur.....	20
Tabulka 4: Vliv druhu superplastifikátoru na pevnosti v tlaku.....	26
Tabulka 5: Vliv množství popílku na sednutí kužele.....	29
Tabulka 6: Receptury a vliv použití a množství popílku na pevnosti betonu v tlaku.....	31
Tabulka 7: Složení zkoušených receptur.....	35
Tabulka 8: Receptury a výsledky zkoušek vlivu množství nS v UHSC.....	44
Tabulka 9: Vlastnosti použitého portlandského cementu.....	52
Tabulka 10: Vlastnosti použitého portlandského cementu.....	53
Tabulka 11: Způsob značení vzorků.....	58
Tabulka 12: Navržené receptury pro pevnostní zkoušky.....	59



Tabulka 14: Navržené receptury pro zkoušení pevností po 3 dnech.....	60
Tabulka 13: Navržené receptury pro ověření vhodnosti způsobu dispergace.....	60
Tabulka 15: Receptury pro měření viskozity.....	62
Tabulka 16: Receptury pro měření vývinu hydratačního tepla.....	63
Tabulka 17: Výsledky pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech.....	67
Tabulka 18: Výsledky pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech.....	70
Tabulka 19: Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 3 dnech.....	73

## 14 Seznam použitých zkratek

SEM Rastrovací elektronový mikroskop

CH Portlandit

Aft Etringit

nS Nanosilika

MS Mikrosilika

HSC Vysokopevnostní beton

UHSC Ultravysokopevnostní beton

SCC Samozhutnitelný beton

MK Metakaolin

CNT Uhlíkové nanotrubičky

SP Superplastifikační přísada

SMF Plastifikační přísada na bázi polykondenzátů sulfonovaných formaldehydů a melaminů

SNF Plastifikační přísada na bázi polykondenzátů sulfonovaných formaldehydů a naftalenů

PC(E) Plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů (éterů)